

# PARTE TERZA

## Richiami di Teoria del Traffico *(Paola Villani)*

### Sommario

Richiami preliminari di teoria del traffico .....	2
I rilievi di traffico .....	3
Il traffico orario .....	8
Fattore ora di punta .....	9
Componenti del traffico .....	10
Indicatori di traffico .....	10
Censimenti di traffico .....	11
Rilievi di velocità .....	13
Variabili di traffico .....	17
Capacità delle strade .....	21
Autostrade (tre corsie per senso di marcia) .....	22
Superstrade (due corsie per senso di marcia) .....	23
Strade ordinarie (unica carreggiata, 2 corsie totali) .....	23
Livelli di servizio .....	25
Livelli di servizio in condizioni di base .....	28
Applicazione pratica dei livelli di servizio .....	30
Le previsioni di traffico .....	34
Domanda di trasporto .....	35
Matrice Origine - Destinazione ( matrice O/D ) .....	35
Il grafo di rete .....	35
Calibrazione del modello .....	36
La simulazione della domanda di traffico .....	37
L'algoritmo .....	37
Analisi dei Costi .....	39
Un esempio: la viabilità per l'accesso alla Fiera di Milano .....	40
Glossario .....	43

## Richiami preliminari di teoria del traffico

La teoria dei flussi di traffico costituisce una materia specifica della Laurea Magistrale dell'area Trasporti. Alcuni spunti essenziali vanno però anticipati in quanto necessari all'impostazione di base del progetto stradale.

La valutazione dei flussi di traffico costituisce difatti la premessa per la progettazione di un qualsiasi intervento viario, sia extraurbano sia urbano.

La funzione economica di una strada è di produrre traffico a velocità controllata: l'entità del traffico determina quindi tutte le scelte progettuali principali.

In ambito urbano la costruzione o l'ampliamento di una strada ricade nelle attività proprie di un Piano Urbano del Traffico, ai sensi dell'art.36 del decreto legislativo 30 aprile 1992, n.285 "*Nuovo codice della strada*", Piano finalizzato ad ottenere un miglioramento delle condizioni di circolazione e di sicurezza stradale, in accordo con gli strumenti urbanistici vigenti e nel rispetto dei valori ambientali in senso lato.

Tutti gli interventi sul sistema della viabilità devono essere concepiti, progettati e verificati nella logica dell'intero sistema della mobilità e dell'assetto del territorio, considerando i diversi momenti degli spostamenti (circolazione esistente) per i diversi modi di trasporto (pedoni, autoveicoli, mezzi di trasporto collettivi, velocipedi e motocicli) per le diverse componenti della mobilità (interna, di scambio e di attraversamento) prendendo in considerazione ovviamente anche il traffico commerciale che interessa l'area in oggetto.

Per valutare razionalmente gli interventi viabilistici occorre procedere con una preliminare analisi conoscitiva dei caratteri essenziali del bacino di utenza e quindi effettuare specifiche analisi:

- territoriali
- socioeconomiche
- relazionali (di attrazione e generazione del traffico)
- di organizzazione del sistema dei trasporti

## I rilievi di traffico

Qualora l'ambito di intervento sia a scala sovracomunale è bene eseguire un'analisi preliminare dei dati reperibili nei Censimenti ISTAT ed in particolare di quelli relativi agli spostamenti (analisi di tipo macro ma utile per orientare tutte le indagini di dettaglio).

Da queste analisi emergeranno alcune considerazioni relative alla quantità dei flussi veicolari che interessano l'area, le direzioni e le modalità di spostamento prevalenti.

Alcune considerazioni potranno essere di tipo quantitativo e saranno legate alle specifiche dinamiche economiche del contesto. Altre saranno legate a specifiche variabili intercorse (l'apertura di un nuovo polo fieristico, ad esempio), altre ancora testimonieranno la realizzazione di nuovi insediamenti residenziali e commerciali. Ma chi lavora nel settore trasporti deve agire con una visione di scenario di lungo periodo (20 – 30 anni almeno), e quindi ogni informazione sulle dinamiche dei flussi dovrà essere tenuta in grande considerazione, onde evitare di progettare e costruire strade che, nell'arco di un breve periodo, possano essere del tutto insufficienti oppure sovradimensionate. Nella concezione di nuove strade si segue spesso un criterio di progressività per successivi ampliamenti e potenziamenti, che vanno previsti però fin dall'inizio, salvaguardando le aree necessarie ai lati del definitivo sedime stradale.

Il traffico sulle strade è variabile in relazione al contesto geografico e al periodo. Ogni modificazione che interessi un'arteria stradale o un'intera rete determina ripercussioni sul tempo complessivo di percorrenza e quindi sulla velocità dei veicoli in transito e sui flussi che impegnano la rete in oggetto. La collocazione di un incrocio semaforico, una rotatoria, un attraversamento pedonale o uno svincolo, sono tutti fattori che determinano ripercussioni in un ambito superiore a quello interessato dalla mera realizzazione del manufatto stradale o provvedimento amministrativo (ad esempio la definizione di "strada a senso unico" rientra tra i provvedimenti di tipo amministrativo).

Stabilire quali debbano essere le sezioni di rilevamento dei flussi di traffico è operazione che richiede uno studio approfondito della motivazione sottesa al rilievo nonché dell'efficacia nel cogliere i flussi principali al netto di possibili deviazioni intermedie. La dimensione dell'intervento in progetto determinerà conseguentemente l'area geografica oggetto di analisi e la numerosità delle sezioni di rilevamento.

L'analisi dei flussi di traffico in una sezione chiusa, come quella che può essere costituita da un tratto autostradale intercluso tra due caselli prossimi tra loro, non costituisce un reale problema per il rilevamento poiché, al di là delle variabili temporali che determinano grandi fluttuazioni nell'arco giornaliero, settimanale o annuale, non vi sono altri fattori esterni che, nel medio o lungo periodo possano in alcun modo apportare modificazioni sui dati rilevati.

Dati di rilievo che, invece, sono soggetti a moltissime altre variabili qualora si tratti di archi stradali in ambito urbano o extraurbano, con interscambi di flussi diffusi con continuità lungo il tracciato.

L'attendibilità del censimento della circolazione effettuato in Svizzera consente di trarre alcune significative indicazioni in ordine alla variabilità del traffico stagionale e nelle 24 ore in funzione delle motivazioni e delle caratteristiche tipologiche della domanda di mobilità.

In moltissimi Paesi il traffico viene attualmente censito sulla base di criteri e direttive abbastanza simili. Nel caso della Svizzera, su un totale di 1.756 km (anno 2005), i punti di rilevazione rappresentati in figura sono 453, ovvero mediamente uno ogni 3,9 km.

I dati in dettaglio sono disponibili all'indirizzo <http://www.astra.admin.ch/>

I diagrammi di variazione del traffico orario sono fondamentali per riconoscere la funzione della strada, caratterizzandone i momenti di punta.

Con riferimento ai valori reali del Censimento Generale Svizzero delle Circolazione si riportano nelle pagine successive sia le mappe tematiche di rilievo sia i diagrammi di distribuzione oraria giornaliera.

Sono impiegati contatori automatici (nell'anno 2009) presso 330 punti di rilievo: 175 effettuano conteggi classificati (sei categorie: veicoli a due ruote, autovetture, bus, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti, autotreni).

# Traffico Giornaliero Medio

Schweizerische Strassenverkehrszählung 2005  
Durchschnittlicher Tagesverkehr

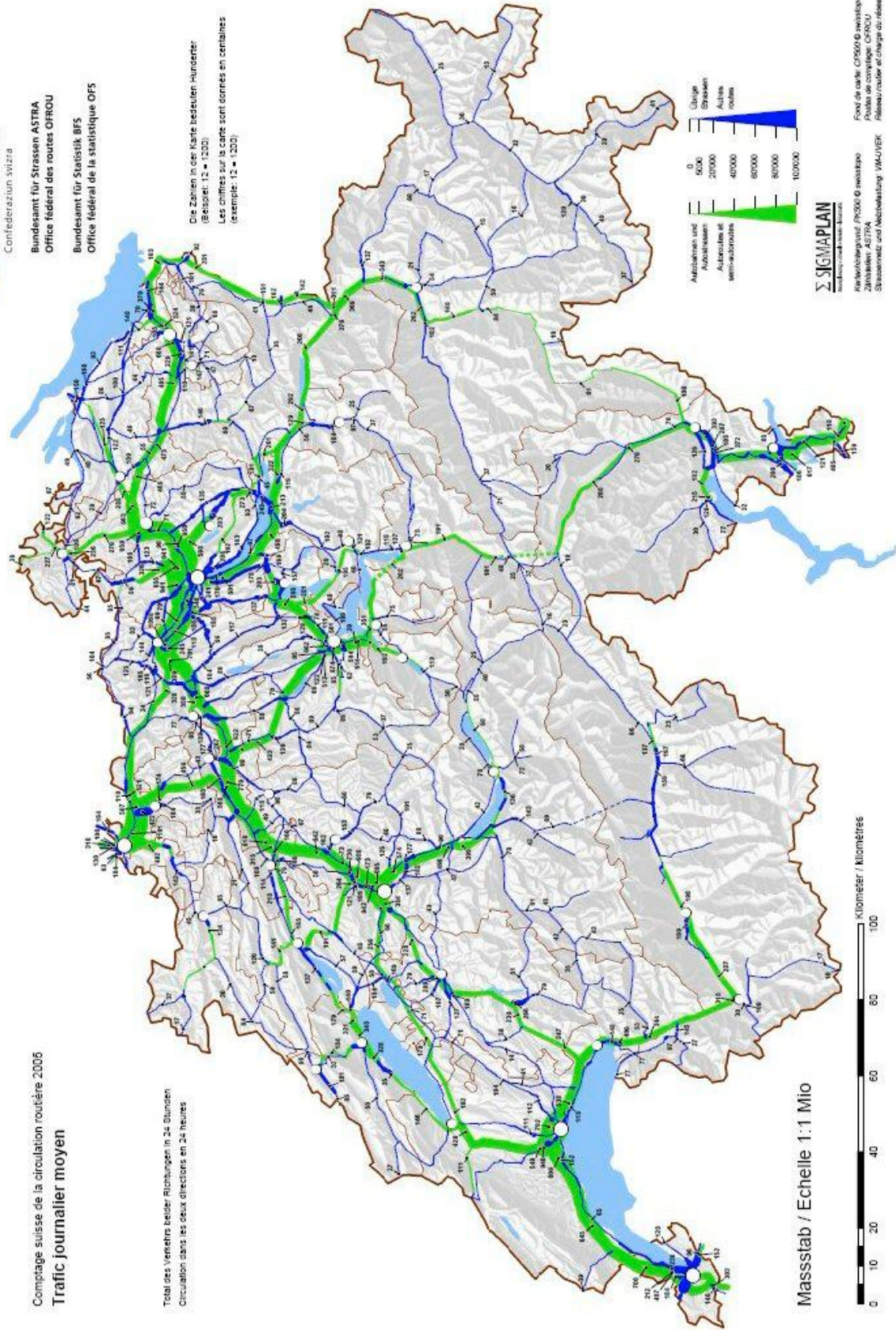
Comptage suisse de la circulation routière 2005  
Trafic journalier moyen

Total des véhicules dans les deux directions en 24 heures  
Circulation dans les deux directions en 24 heures

 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA  
Office fédéral des routes OFROU  
Bundesamt für Statistik BFS  
Office fédéral de la statistique OFS

Die Zahlen in der Karte bedeuten Hunderte  
(Beispiel: 12 = 1200)  
Les chiffres sur la carte sont donnés en centaines  
(exemple: 12 = 1200)







**Censimento automatico dei veicoli**

Traffico di lunga percorrenza con scarso pendolarismo: le variazioni orarie sono caratterizzate da punte ben marcate e relative ai giorni festivi. Nelle 24 ore si rilevano punte di traffico evidenti, e volumi di traffico deboli nelle ore serali e notturne.

#### Traffico di lunga percorrenza con scarso pendolarismo



Traffico locale e di lunga percorrenza con pendolarismo: Si rileva una significativa variabilità del traffico nei diversi giorni della settimana. Nel corso della giornata la punta del mattino è elevata ma meno marcata di quella del tardo pomeriggio ove ai flussi pendolari si sommano altri flussi per motivi di lavoro e svago. Le variazioni giornaliere denunciano due punte ben distinte alla mattina e alla sera ma sono riconoscibili anche punte a metà giornata.

#### Traffico di lunga percorrenza con pendolarismo



Traffico pendolare: Nelle 24 ore si determinano forti punte sia la mattina sia la sera.

#### Traffico pendolare



## Il traffico orario

Tutti i rilievi di traffico vanno sempre riferiti all'ora, effettiva o virtuale. Esempio: in molte città italiane l'ora di punta serale è quella tra le 17.45 e le 18.45, ora che potremmo definire appunto "virtuale" poiché composta da rilievi di traffico pari a 10 o 15 minuti e che sommati identificano l'ora di punta. In realtà in una stessa città si avranno diverse ore di punta in relazione all'ubicazione dell'arco stradale considerato e delle funzioni presenti. E' compito di chi valuta i flussi di traffico determinare quale possa essere l'ora più idonea per valutare la situazione di punta da prendere a riferimento progettuale.

L'entità del flusso veicolare, solitamente rapportata a base oraria, viene correntemente definita quale "portata veicolare" o anche più semplicemente "portata"  $Q$  nell'intervallo di tempo  $DT$ , solitamente espressa in veicoli/ora (veic/h). La capacità corrisponde invece alla massima portata veicolare possibile in un determinato tratto di strada.

Come vedremo in seguito la capacità di un arco stradale è determinata da numerose variabili che includono la geometria, la presenza – assenza di spazi parcheggio sulla sede stradale, l'ubicazione in ambito urbano – extraurbano dell'arco oggetto di analisi, la presenza – assenza di impianti semaforici o semplici intersezioni oppure attraversamenti pedonali, ecc.

Le caratteristiche geometriche, tipologiche, spaziali e funzionali determineranno quindi differenti capacità di deflusso.

Per definire la portata di riferimento di una sezione stradale occorre cogliere tutte le fluttuazioni di traffico di durata inferiore all'ora e si adottano intervalli  $DT$  pari di solito a:

- 15 minuti in ambito extraurbano
- 5 – 10 minuti in ambito urbano.

Tali intervalli corrispondono ai periodi massimi di congestione o blocco del traffico da ritenersi, al limite, ancora ammissibili da parte dell'utenza.

Maggiore è il tempo di viaggio (extraurbano) maggiore risulta la pazienza per una coda o interruzione del traffico.

Si definisce deflusso orario equivalente, o anche grado di flusso (GF), nel tempo  $DT$  quello definito dalla formula

$$GF \text{ (deflusso orario equivalente veic/h)} = F_{DT} [\text{veic}] * 60/DT [\text{minuti rilevati}]$$

ove  $F$  rappresenta il valore di flusso rilevato nell'unità di tempo  $DT$  assunta a riferimento.



Quindi, a titolo di esempio, con un flusso rilevato pari a 300 veicoli nell'arco temporale di 15' avremo un deflusso orario equivalente pari a  $300 \cdot 60 / 15 = 1.200 \text{ veic/h}$

Per effettuare rilievi di traffico si ricorre solitamente a metodi automatici: tubi pneumatici contaveicoli, spire induttive, sensori piezoelettrici, sensori magnetici, rilevatori agli infrarossi, rilevatori ad ultrasuoni, rilevatori acustici, telecamere e sistemi per il trattamento automatico delle immagini.

Fattore ora di punta

Per determinare il servizio di una infrastruttura si ricorre al **peak hour factor (phf)**, fattore dell'ora di punta) valore che esprime il rapporto esistente fra il numero di veicoli in transito nella sezione di rilevamento durante l'ora di punta e il massimo deflusso orario equivalente registrato nei periodi (DT) inferiori all'ora. Tanto più il valore sarà inferiore ad uno, tanto più la strada risulta essere soggetta a fenomeni di carico veicolare concentrato in tempi limitati.

Questo rapporto **phf** dipende dal volume di traffico rilevato nella frazione (DT) dell'ora di punta ( $V_{DT}$ ) e l'effettiva portata oraria di deflusso veicolare ( $V_{60}$ ) secondo la formula,

$$phf = [ V_{60} (veic) / V_{DT} (veic) ] * [ (DT (min) / 60 (min)) ]$$

Ad esempio se in un'ora passano 1200 veicoli, ma nei 15 minuti più carichi ne passano 400, si ottiene  $phf=0,75$ . Se ogni 15' invece ne passano sempre 300 si ottiene  $phf = 1$

Il **phf** rileva quindi le fluttuazioni sub-orarie. Al crescere dei volumi di traffico in transito nel tempo DT, il valore **phf** potrebbe avere un valore molto basso, tendente a 0,55 – 0,6 come nel fenomeno che si verifica ad esempio nel caso di veicoli in uscita da un parcheggio dopo una manifestazione sportiva o un concerto. Una sostanziale uniformità tra i sub-periodi rilevati e l'ora di punta sarà invece caratterizzata da un **phf** pari a 1,00.

Negli Stati Uniti, assumendo convenzionalmente una durata di 15 minuti per il periodo di massimo carico veicolare, si sono ricavati per strade extraurbane valori di PHF compresi fra 0,83 e 0,96. Nel corso di una ricerca condotta in Italia su autostrade a due corsie per carreggiata, prendendo in considerazione le durate effettive dei periodi di portata costante, ed esaminando un'ampia gamma di situazioni caratterizzate da portate comprese fra un minimo di 300 veic/h e un massimo di oltre 3.200 veic/h, si è ricavata la distribuzione di frequenza dei PHF, e si è osservato come la

probabilità che il PHF assuma un valore inferiore a 0,85 è soltanto del 9%; pertanto nelle pratiche applicazioni in Italia è opportuno assumere almeno  $PHF = 0,85$ .

### Componenti del traffico

Il traffico sulle strade è composto da varie categorie di utenza:

- pedoni,
- velocipedi,
- ciclomotori,
- autovetture,
- veicoli commerciali leggeri (sino a 3,5 tonnellate)
- veicoli commerciali pesanti ( da 3,5 a 7,5 tonnellate)
- autotreni
- autoarticolati
- autobus

e, sebbene rientrino nel traffico di alcune grandi città, i veicoli in sede vincolata (tram) non sono oggetto di rilievo, così come non lo sono le macchine operatrici (rilevate solo nei contesti rurali).

L'ingombro dinamico, unitamente alle diverse capacità di accelerazione e frenata, è molto diverso e quindi è necessario distinguere le categorie ai fini di poter instaurare rapporti di equivalenza tra le varie componenti . In molti casi si tende ad effettuare rilievi volti a quantificare le sole seguenti componenti principali: cicli e moto, automobili, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti (categoria alla quale vengono assimilati anche gli autobus).

I modelli di assegnazione sovente richiedono che il dato complessivo e relativo al traffico che interessa una certa strada, sia espresso in termini di veicoli equivalenti: per ottenere questo valore si ricorre ad appositi coefficienti, variabili per i veicoli commerciali da un minimo di 2 autovetture equivalenti ad un massimo di 10 (ad esempio per strade di montagna). Cioè un transito orario di 100 camion viene trasformato in 200-1000 veicoli equivalenti.

### Indicatori di traffico

Il flusso di traffico su una qualsiasi strada presenta variazioni stagionali, settimanali, giornaliere ed orarie oltre alle fluttuazioni sub-orarie citate. In un anno abbiamo 8760 ore e altrettanti diversi valori.

E' quindi necessario individuare due indicatori di sintesi:

- TGM (Traffico Giornaliero Medio) risultante dal volume di traffico annuo diviso 365
- $T_{phn}$  (Traffico Ora di Punta Normale) corrispondente alla situazione ricorrente di maggior circolazione (esclusi eventi rari).

Tra i due indicatori esiste una relazione  $T_{phn} = a * TGM$

Dove  $\alpha$  è tanto maggiore quanto più marcate sono nell'anno le fluttuazioni rispetto alla media.

In genere si riscontra

$\alpha = 0,15$  per le strade extraurbane (con un intervallo possibile 0,08 – 0,20)

$\alpha = 0,10$  per le strade urbane (con un intervallo possibile 0,05 – 0,12)

Si definisce quindi l'ora di punta come una percentuale del TGM, percentuale di solito variabile tra il 10 % e il 15%.

Ordinando i traffici orari per valori decrescenti si hanno le curve delle figure seguenti. In origine veniva assunto il flusso della trentesima ora di punta (superato cioè solo ventinove volte all'anno): oggi ci si orienta attorno alla centesima ora, secondo il diagramma in calce.

La finalità è di evitare di dimensionare le strade per eventi occasionali di flusso, accettando la presenza di congestione per un numero limitato di ore nell'anno, ore di punta da non ritenersi quindi significative ai fini del servizio della strada. Dimensionare una strada per la massima punta oraria dell'anno ne comporterebbe difatti il sottoutilizzo per le rimanenti 8.759 ore: l'ideale è collocare  $T_{hpn}$  dove la curva di distribuzione si appiattisce e a lievi variazioni di ordinate corrispondono grandi mutazioni in ascissa, cioè di ore "in sofferenza" se dimensionate per valori inferiori di portata.

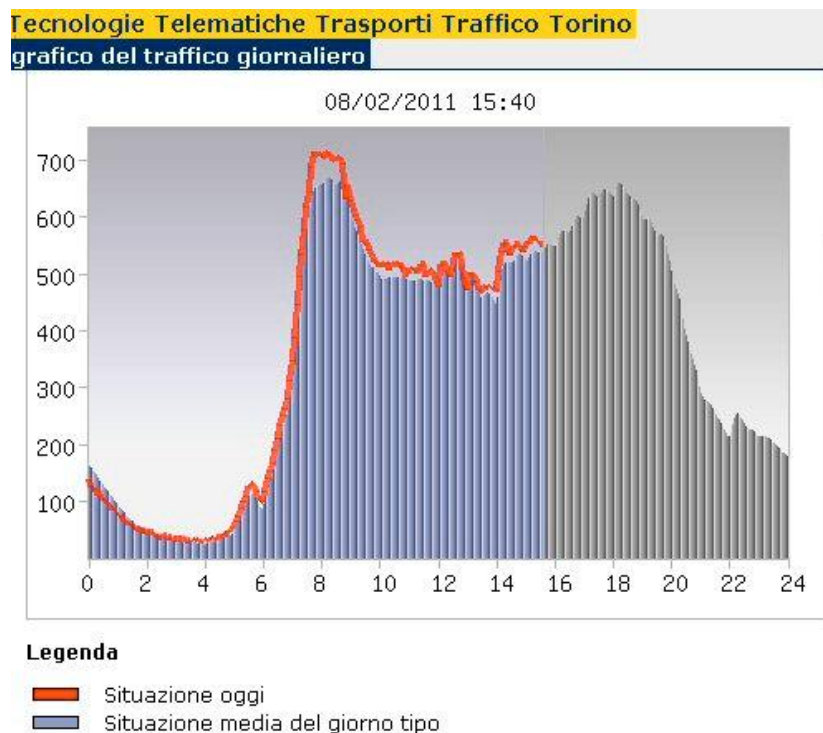


Censimenti di traffico

Sono di due tipi:

- censimenti generali sull'intera rete al fine di per ottenere il TGM attraverso misure campionarie, Solitamente si tende ad avere un campione pari a 16 giorni nell'arco dell'anno e da questo

campione si desume il TGM. Nelle grandi aree metropolitane però i rilievi del traffico avvengono in continuo: a Torino il TGM è calcolato in tempo reale sulla base dei dati delle 500 sezioni di rilievo monitorate da 1500 spire (figura in calce)



- censimenti mirati su poche arterie qualora vi siano precise finalità di progetto o riqualificazione al fine di ottenere direttamente il traffico dell'ora di punta  $T_{hpn}$  (almeno due - tre giorni alla settimana)
- Per la rappresentazione dei dati di censimento o di rilievo si ricorre spesso a flussogrammi.



I censimenti sono volti prevalentemente a stimare l'entità dei flussi di traffico e determinare in prima approssimazione quali possano essere le origini – destinazioni prevalenti nell'area in esame.

Per una migliore comprensione del fenomeno è possibile integrare la sola misura quantitativa dei flussi con interviste mirate relative anche ad altri elementi quali la durata del viaggio, i motivi dello spostamento, la frequenza, ecc.



I *censimenti origine – destinazione* possono essere effettuati: a) elaborando i dati dei censimenti ISTAT, b) effettuando indagini telefoniche (metodo CATI); c) rilevando le targhe; d) intervistando un campione pari al 10 – 20 % dei conducenti in transito.

Censimenti mirati e *analisi origine – destinazione* si adottano sempre al fine di determinare, nella fase di progettazione di nuove strade o collegamenti, quali possano essere i volumi di traffico deviati, generati o attratti da nuovi o mutati interventi viari. Non bisogna infatti dimenticare come ogni nuovo collegamento determini nuove modalità di utilizzo dell'intera rete.

#### Rilievi di velocità

Possono essere riferiti ad una sezione (*variabilità nel tempo di velocità istantanea*) e ad un tratto omogeneo (*velocità media*). Per  $n$  veicoli rilevati la velocità media nel tempo del rilievo ( $V_t$ ) è

$$V_t = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i$$

La velocità media nello spazio  $V_s$  è

$$V_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{L}} = \frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}}$$

In cui  $V_i$  è la velocità del veicolo  $i$ -esimo ed  $L$  è la lunghezza del tratto. Non sono sufficienti i valori medi, servono anche:  $V_{85}$  velocità dell'85° percentile superata solo dal 15% dei conducenti e  $V_{modale}$  intervallo cinematico più frequente

Si definisce *passo del traffico* l'intervallo continuo di minor estensione cinematica con il 50% di frequenza. Occorre fare attenzione alle unità di misura. La relazione base è la seguente

$$V[\text{km/h}] = v[\text{m/s}] \cdot 3,6$$

E quindi si hanno correntemente le relazioni:

$$36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$$

$$54 \text{ km/h} = 15 \text{ m/s}$$

$$72 \text{ km/h} = 20 \text{ m/s}$$

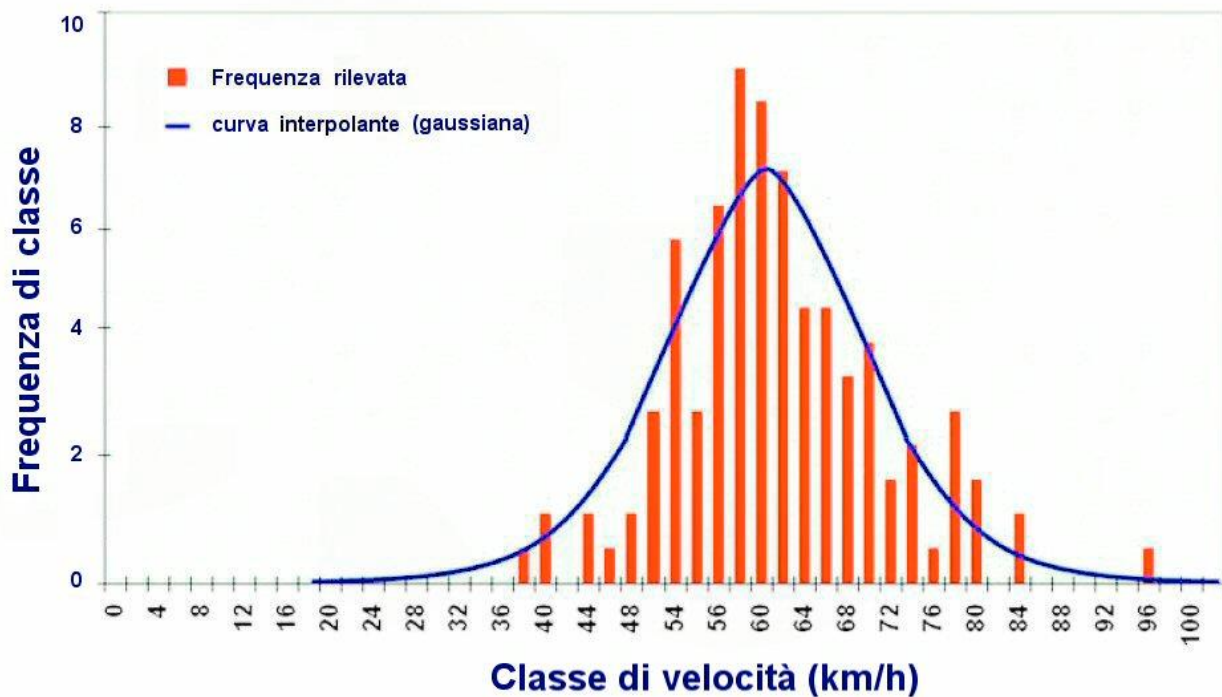
$$100 \text{ km/h} = 27 \text{ m/s}$$

$$130 \text{ km/h} = 36 \text{ m/s}$$

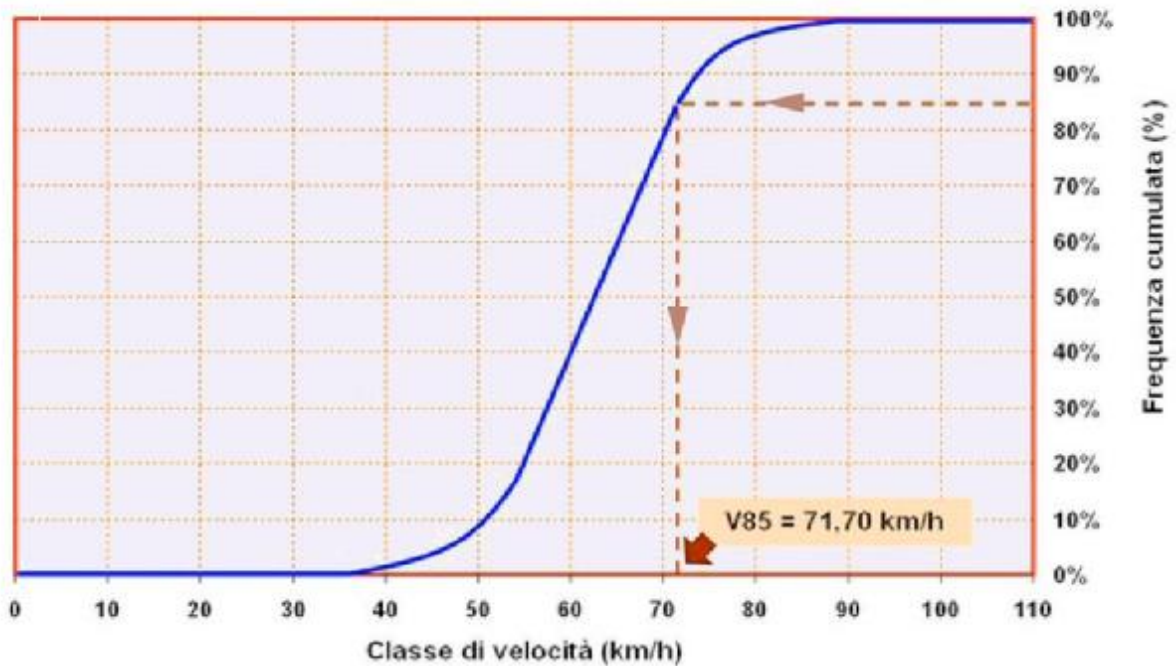
Per cogliere il significato di una distribuzione di velocità rilevata si utilizzano due diagrammi:

- distribuzione di frequenza per classi di velocità
- curva cumulata delle percentuali

## Distribuzione in frequenza delle velocità



## Distribuzione delle frequenze cumulate e velocità



Un esempio completo di rilievo cinematico si ha nelle successive figure dove è frequente, una vasta elusione dei limiti teorici:

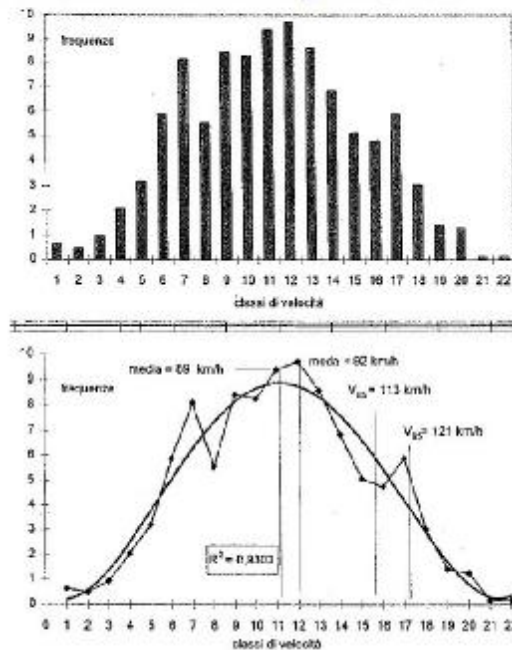
- velocità di progetto della strada (80 km/h)
- velocità ai sensi del Codice della Strada per le extraurbane (90 km/h)

Entrambe tali velocità, nella figura, vengono superate da un consistente numero di utenti.

### Ss. 159 dei Monti Lepini

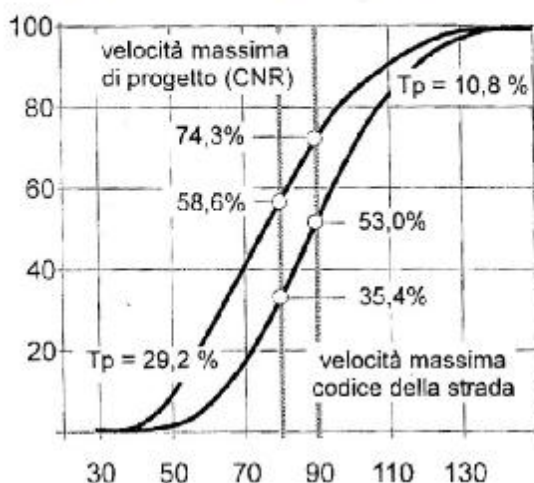
#### Distribuzione per classi di velocità ( $T_p = 10,8\%$ )

Percentuale traffico presente			
$T_p = 10,8\%$			
Numero passaggi totali			
$N = 2548$			
classe	velocità	passaggi	frequenze
1	fin a 40	48	0,020
2	41-45	35	0,477
3	46-50	71	0,842
4	51-55	150	2,000
5	56-60	240	3,100
6	61-65	445	5,501
7	66-70	610	6,505
8	71-75	425	5,635
9	76-80	638	6,434
10	81-85	625	6,288
11	86-90	708	9,589
12	91-95	731	9,064
13	96-100	648	8,580
14	101-105	518	6,960
15	106-110	385	5,105
16	111-115	385	4,820
17	116-120	440	5,835
18	121-125	226	3,020
19	126-130	108	1,432
20	131-135	56	1,273
21	136-140	12	0,159
22	oltre 140	19	0,133



La curva cumulata individua il comfort cinematico dell'utenza: quanto più tende ad un asintoto orizzontale tanto maggiore sarà la possibilità per ogni conducente di mantenere la velocità desiderata senza che questo influisca sulle condizioni generali del traffico.

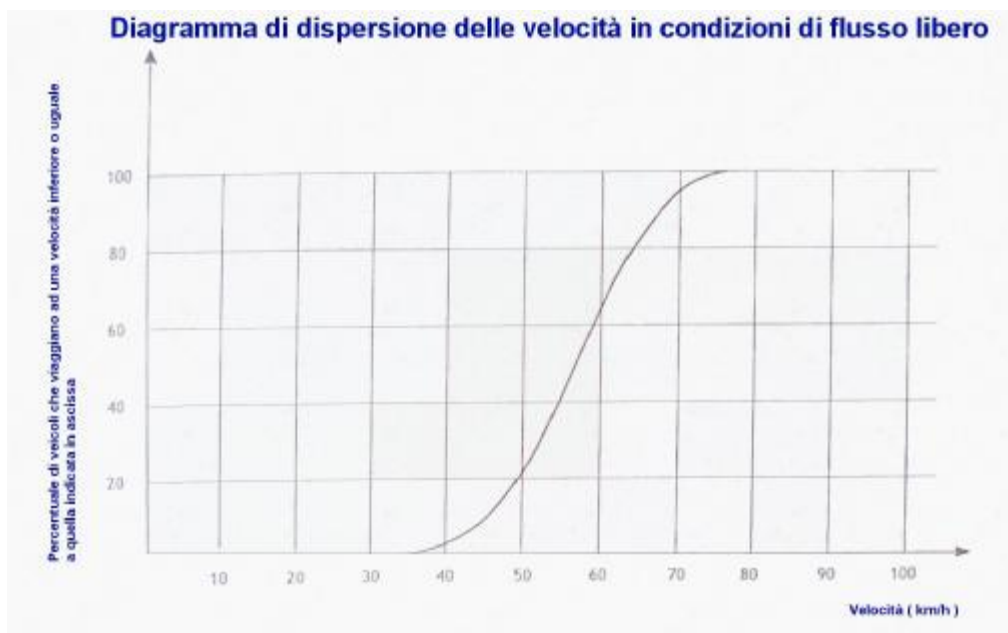
### Ss. 159 dei Monti Lepini - Distribuzione percentile delle velocità ( $T_p = 10,8\%$ e $T_p = 29,2\%$ )



Distribuzione percentile delle velocità  
e  
percentuale di veicoli con  $V > V^*$

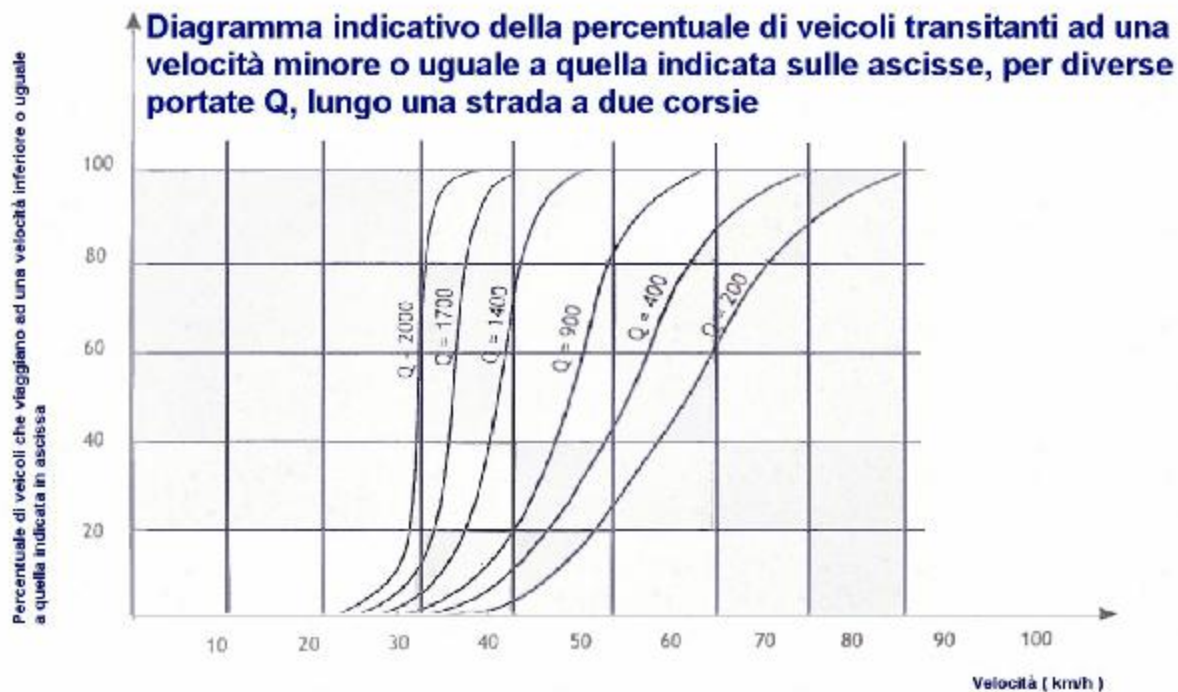
per ...	10,8 % $T_p$	29,2 % $T_p$
$V^* = 80 \text{ km/h}$	64,6 %	41,4 %
$V^* = 90 \text{ km/h}$	47,0 %	25,7 %

Se la curva invece tenderà all'asintoto verticale significa che tutti i veicoli vanno alla stessa velocità (sono in coda).



Nello stesso punto di rilevamento la forma della curva cumulata varia all'aumentare del traffico.

Nel grafico qui riportato si nota la variazione da 200 a 2000 veic/h.



Se riscontriamo in particolare  $V_{85}$  nella distribuzione delle velocità per i diversi regimi di traffico rileviamo immediatamente il progressivo decadimento della cinematica della strada da parte degli utenti tendenzialmente più veloci. Ecco perché  $V_{85}$  viene usata come indicatore sensibile delle condizioni effettive di flusso.



Variabili di traffico

Oltre alla portata  $Q$  [veic/h] e alla velocità  $V$  [km/h] è importante un terzo parametro: la densità  $D$  [veic/km] che esprime, per singola corsia, il numero dei veicoli presenti, nel momento considerato e nel tratto omogeneo considerato.

La relazione fondamentale di deflusso è

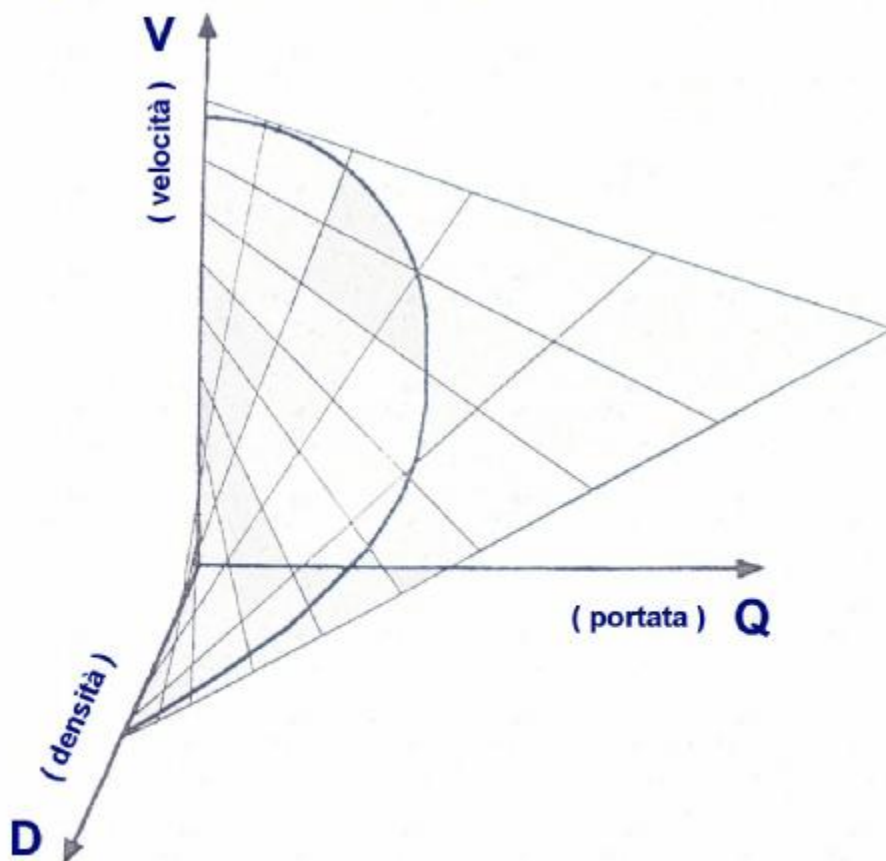
$$Q \text{ [veic/h]} = D \text{ [veic/km]} * V \text{ [km/h]}$$

Quindi avremo ad esempio una portata di 1800 veic/h per una densità di 30 veicoli/km a una velocità media di deflusso pari a 60 km/h

Per il flusso ininterrotto esistono relazioni tra le tre variabili ottenute da modelli:  
deterministici (rilievi)  
stocastici (teoria delle probabilità).

La funzione di tre variabili viene definita nello spazio come in figura.

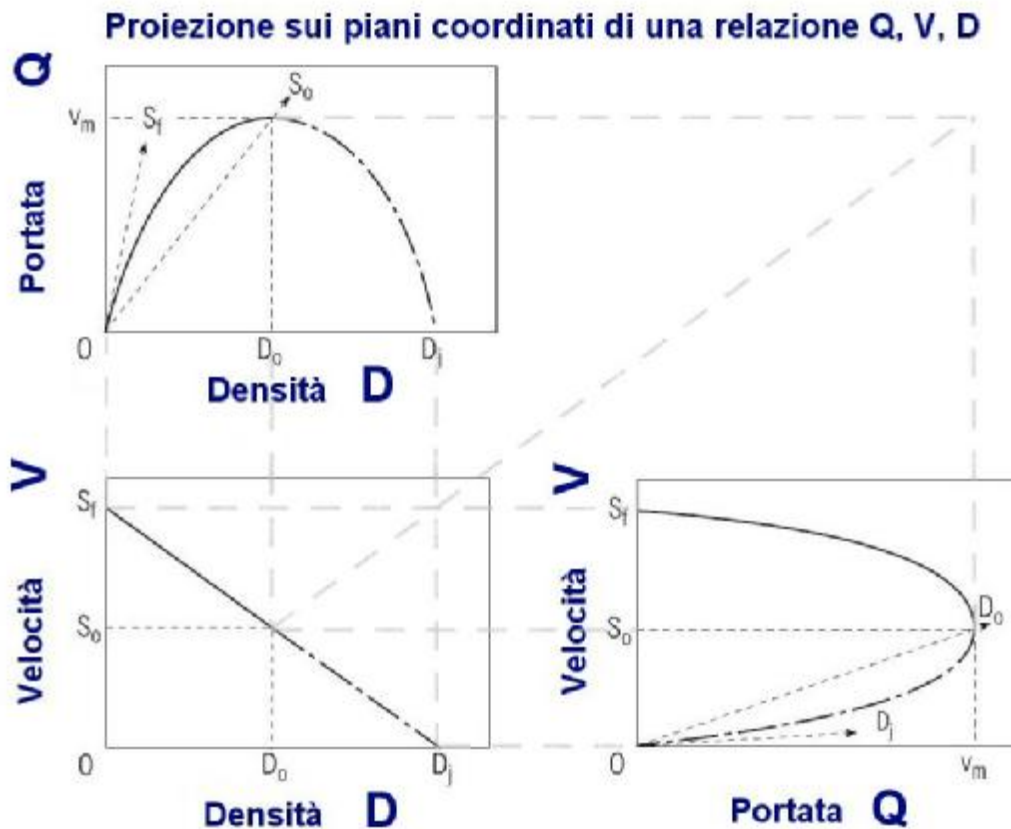
**Superficie di fisica ammissibilità per le relazioni  $Q$ ,  $V$ ,  $D$**



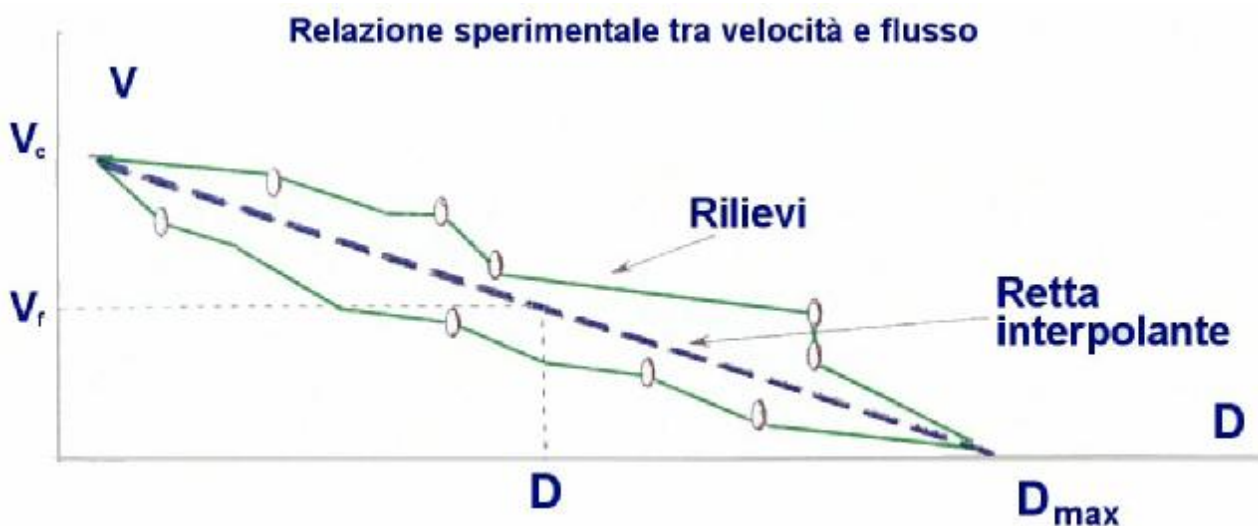
Le relazioni tra coppie di variabili si notano nella figura in calce, individuando in genere legami anche non lineari e valori critici.

La densità  $D_0$  è quella cui corrisponde la massima portata alla velocità  $V_m$ .

La densità  $D_j$  corrisponde ad una coda di veicoli fermi. La congestione inizia quando calano  $V$  e  $Q$  e aumenta soltanto  $D$ .



Nel grafico la relazione tra  $V$  e  $D$  si ottiene da rilievi puntuali del tratto di strada precedente la sezione di rilevamento. La retta interpolante adatta ai singoli casi specifici la relazione fra le grandezze tra cui permane comunque un legame di tipo lineare.



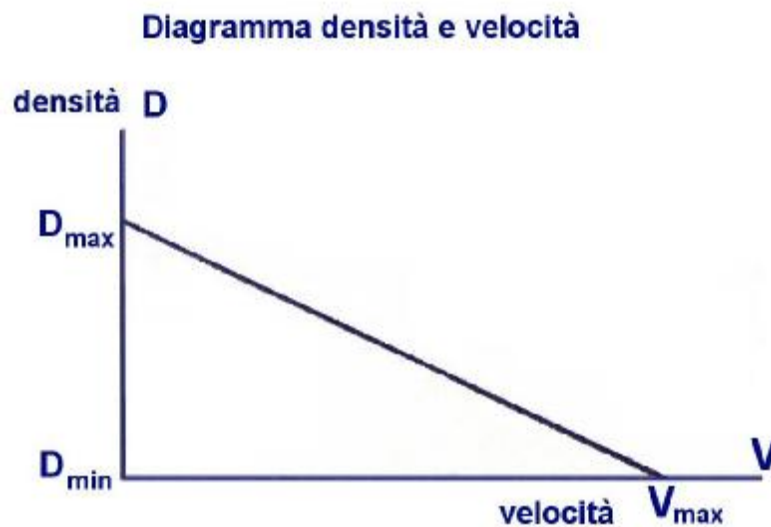
In prima approssimazione può valere in generale la relazione:

$$D = D_{\max} - kV$$

con  $K = (D_{\max} / V_{\max})$  e quindi:

$$D = D_{\max} [1 - (V / V_{\max})]$$

Con l'annotazione che, per veicoli fermi ( $V = 0$ ) la variabile  $D$  assume il valore massimo  $D_{\max}$ , mentre per la  $V_{\max}$  variabile  $D$  assume il valore minimo  $D_{\min}$  (è il caso di un veicolo isolato o della totale assenza di veicoli).



Sostituendo a  $D$  l'espressione precedentemente esposta, si ottiene:

$$Q = V \cdot [D_{\max} - V (D_{\max} / V_{\max})]$$

e anche

$$Q = D_{\max} \cdot [V (V^2 / V_{\max})]$$

Che è una relazione non lineare tra  $Q$  e  $V$  (parabola) e che per  $V = 0$  restituisce  $Q = 0$ , mentre per  $V = V_{\max}$ ,  $Q = Q_{\max}$

Se si deriva la  $Q$  rispetto a  $V$ , si ottiene

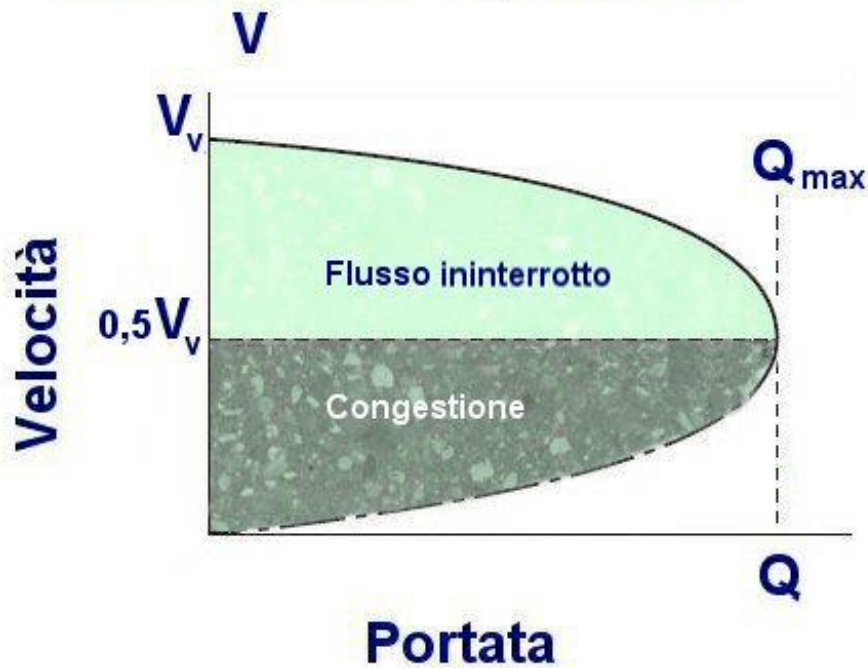
$$dQ/dV = D_{\max} \cdot [V (V^2 / V_{\max})] \cdot 2V$$

e quindi anche il valore massimo di  $Q$ , per  $dQ/dV = 0$ , pari a  $V = V_{\max} / 2$

Il massimo valore possibile della portata  $Q$  corrisponde alla capacità, ovvero il numero massimo di veicoli che può transitare lungo una corsia o una carreggiata della sezione presa a riferimento. La

velocità  $V_{\max}$  viene anche assimilata alla velocità a vuoto o velocità di un veicolo isolato, alla quale, per definizione, corrisponde la velocità di progetto, posta a base della Normativa nella geometria stradale. Il valore massimo di portata si verifica per velocità del flusso pari a circa la metà della velocità massima, ciò porta a considerare come il fattore velocità sia avverso al fattore flusso.

## Curva di deflusso: relazione teorica tra velocità $V$ e portata $Q$





In pratica, in accordo con i rilievi sperimentali si può adottare una linea spezzata, genericamente riportata come nella figura seguente.



La spezzata di deflusso in figura fa riferimento, in termini di velocità massima a quella autostradale (140 km/h): per questa tipologia di strade la velocità riferita alla capacità massima non corrisponderà alla metà della velocità di progetto (70 km/h), ma ad un valore inferiore (50 km/h) determinato dal comportamento degli utenti. Come pure può verificarsi che se il regime di guida dei conducenti risulta essere irrispettoso delle distanze di sicurezza previste dal Codice della Strada, la spezzata di deflusso si tradurrà in una retta quasi parallela all'asse delle ascisse.

La curva di deflusso, tradotta nella pratica in una spezzata di deflusso, consente di definire due possibili condizioni di fluidità del traffico: una, corrispondente al ramo superiore, ove il flusso si mantiene sostanzialmente stabile, e l'altra, relativa al ramo inferiore, ove il flusso è caratterizzato da interruzioni (flusso che definiremo "instabile") sino al punto di raggiungere la congestione e il blocco del traffico. Generalmente però, per la complessità del fenomeno e per la grande variabilità dei parametri influenti, è d'uso fare riferimento a rilievi sperimentali più che a formulazioni teoriche.

## Capacità delle strade

I primi studi sistemi sul tema della capacità risalgono al 1960, quando fu pubblicato negli USA il primo Highway Capacity Manual (di seguito HCM) che attraverso rilievi di traffico condotti su 100.000 km di strade definì una teoria generale adottata poi in tutto il mondo.

Nell'ultima versione dell'HCM (del 2000) a cura del Transportation Research Board di Washington, vengono individuate, per la determinazione della capacità, tre fondamentali tipologie di strade extrurbane operanti in condizioni di deflusso ininterrotto:

- autostrade (controllo totale degli accessi ed assenza di incroci o disturbi laterali)
- superstrade (più corsie per carreggiata ma velocità inferiore e senza corsia di emergenza)
- strade ordinarie (unica carreggiata e due corsie totali con svincoli anche a raso)

Le strade urbane (flusso interrotto) hanno valori di capacità dipendenti prevalentemente dai tempi di verde delle regolazioni semaforiche.

Autostrade (tre corsie per senso di marcia)

La capacità massima di una corsia autostradale può raggiungere i 2.400 veic/h: questo significa che, per un tratto autostradale a tre corsie per carreggiata avremo un massimo di 7.200 veic/h.

Tale valore per corsia richiede comunque che siano garantite le "condizioni ottime" così definite in quanto ottimizzano la geometria stradale ai fini della capacità):

- larghezza di corsia > 3.66 metri (12 piedi)
- franco laterale (banchina) > 1,83 metri (6 piedi)
- franco centrale (spartitraffico) > 0,60 metri
- traffico di sole autovetture (veicoli equivalenti)
- almeno tre corsie per direzione
- svincoli a più livelli e distanziati > 3 km
- pendenza longitudinale < 2 %
- velocità di progetto (o di flusso libero) > 110 km/h
- controllo assoluto accessi laterali
- velocità di progetto > 112 km/h

La mancata osservanza dei parametri geometrici comporta coefficienti riduttivi della capacità: la presenza di accessi laterali, ad esempio, verrà calcolata con un fattore riduttivo inferiore a 1 che determina un valore di veicoli/h minore rispetto all'ottimo stabilito.

Conseguentemente se un arco stradale non presenta una o più voci corrispondenti alle condizioni ottime prestabilite, perde di capacità rispetto al limite teorico di 2400 veic/h per singola corsia.

HCM 2000, attraverso una serie di grafici e tabelle, abbina al mancato rispetto di ogni caratteristica delle "condizioni ottime" dell'arco stradale un coefficiente riduttivo della capacità teorica e/o della  $V_{FL}$ , velocità di flusso libero.

Superstrade (due corsie per senso di marcia)

La capacità massima di una corsia di tale tipologia stradale a doppia carreggiata, con due corsie per senso di marcia, può raggiungere i 2.000 veic/h.

Le "condizioni ottime" sono più o meno le stesse delle autostrade ad eccezione di

- velocità di flusso libero > 70 km/h
- controllo limitato degli accessi
- possibile assenza di spartitraffico (assenza di banchine o di barriere tipo New Jersey)

Si noti come la sola deroga parziale alle sopracitate tre indicazioni "ottime" fa scemare, rispetto alle autostrade, la capacità per corsia da 2400 a 2000 veicoli/h.

### **Strade ordinarie (unica carreggiata, 2 corsie totali)**

La capacità massima di una corsia non autostradale, come nel caso in esame, può raggiungere i 1.600 veic/h per senso di marcia: questo significa che avremo al massimo 3.200 veicoli/ora complessivamente nei due sensi.

La differenza rispetto alle precedenti tipologie deriva da una modifica della circolazione:

- per le manovre di sorpasso sulla corsia opposta
- per l'instaurarsi di un flusso a plotoni
- per i perditempo in coda a causa di sorpassi impediti

Le "condizioni ottime" sono le seguenti:

- velocità di progetto > 100 – 110 km/h
- larghezza di corsia > 3.60 m
- banchine laterali > 1.80 m
- sorpasso consentito in sicurezza su intero sviluppo con adeguata visibilità
- flusso di sole autovetture (veicoli equivalenti)
- regolazione adeguata (a raso) di incroci e accessi
- pendenza longitudinale < 2% (strada in pianura)
- flusso equilibrato nelle due direzioni.

HCM 2000 propone anche per questa tipologia stradale un coefficiente riduttivo (<1) per ogni caratteristica non rispondente a quelle che sono indicate per determinare l'ottimo.

In genere quindi la Capacità Effettiva ( $C_E$ ) può desumersi dalla Capacità Ottima ( $C_O$ )

$$C_E = C_O \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \dots$$

Dove  $r_i$  è il coefficiente riduttivo da applicarsi per ogni difformità rilevata con  $r_i \leq 1$

Ad esempio ammettendo una riduzione di larghezza delle banchine ( $r_1 = 0,93$ ) e una visibilità per il sorpasso limitata al 50% del tracciato ( $r_2 = 0,88$ ) la capacità effettiva di ogni corsia diventa

$$C_E = 1.600 \cdot 0,93 \cdot 0,88 = 1.310 \text{ veic/h}$$

e la capacità complessiva nei due sensi della strada si riduce da 3.200 a 2.620 veic/h.

I vari coefficienti  $r_i$  sono riportati nelle tabelle dell'HCM 2000.

Si ribadisce che la capacità teorica desumibile dall'HCM vale soltanto in condizioni di flusso ininterrotto, in genere presente negli archi di viabilità extraurbana.



## Livelli di servizio

Nel manuale HCM il campo descritto dalla curva di deflusso viene suddiviso in porzioni che possono corrispondere ad altrettante condizioni qualitative del servizio offerto dalla strada in termini di soddisfazione dell'utenza. Si definiscono livelli di servizio gli intervalli di velocità del flusso, ai quali corrispondono altrettanti intervalli di densità veicolare.

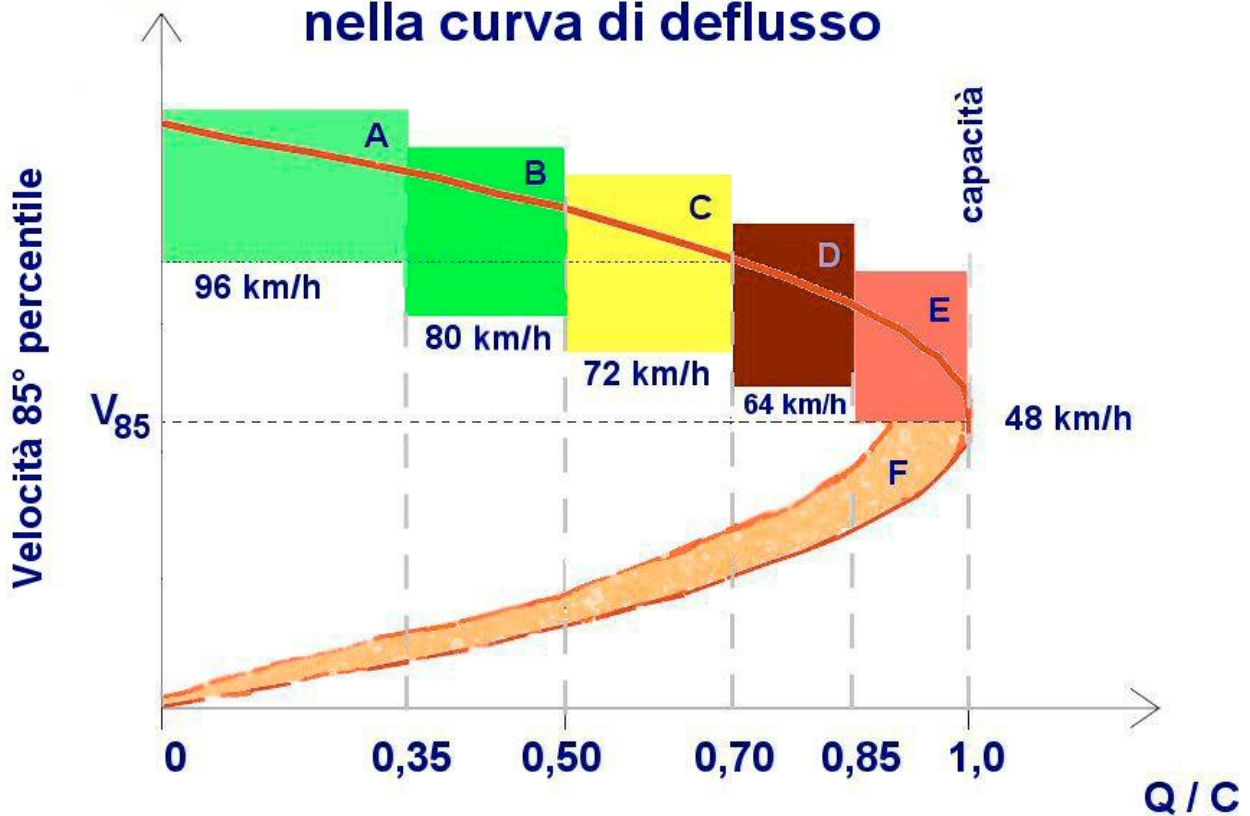
Livello di servizio (autostrade e superstrade)	Densità (veicoli / km per corsia)
A	0 - 7
B	7 - 11
C	11 - 16
D	16 - 22
E	22- 28
F	> 28

Per dimensionare e/o verificare le strade in base ai flussi veicolari non si ricorre direttamente alla capacità bensì alla teoria dei LOS (Level of Service) definita già nell'HCM dal 1960.

Nel manuale si prendono come riferimento esemplificativo di tutte le molteplici condizioni di traffico, sei situazioni tipiche che equivalgono a sei diversi livelli di servizio, individuati rispettivamente e qualitativamente come rappresentato nella figura con le lettere da A a F, dalla situazione migliore alla peggiore.

A	Rappresenta le condizioni di flusso libero con totale assenza di condizionamento tra i veicoli;
B	Rappresenta le condizioni di deflusso con qualche limitazione alla libertà di manovra, ma ancora con elevate condizioni di conforto fisico e psicologico;
C	Si hanno ora maggiori condizionamenti: per mantenere la velocità desiderata occorrono cambi di corsia e/o sorpassi piuttosto frequenti che richiedono notevole attenzione da parte degli utenti;
D	In queste condizioni il flusso è ancora stabile, ma la libertà di manovra è notevolmente ridotta ed è basso il livello di conforto fisico e psicologico degli utenti;
E	I condizionamenti sono pressoché totali ed i livelli di conforto sono scadenti; il limite inferiore di questo livello corrisponde alla capacità; le condizioni di deflusso sono al limite della instabilità;
F	Questo livello rappresenta le condizioni di flusso forzato con frequenti ed imprevedibili arresti della corrente, ossia con marcia a singhiozzo (stop and go)

## Individuazione grafica dei livelli di servizio nella curva di deflusso



All'aumento della portata (o del rapporto  $Q/C$ ) corrisponde un decadimento della prestazione stradale con una generale diminuzione della velocità di marcia (sia media sia  $V_{85}$ ).

A grandi linee per le strade extraurbane si può così collegare il livello di servizio al rapporto  $Q/C$  (portata/capacità)

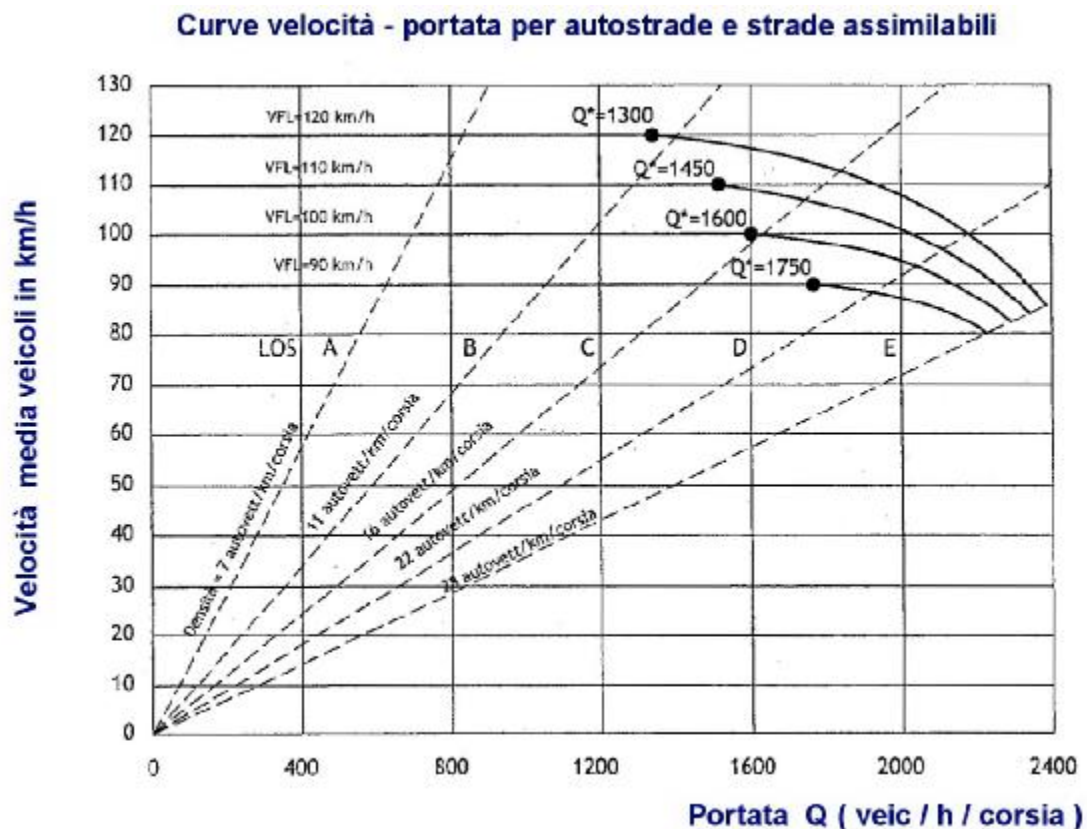
#### Livello di servizio

A	$Q/C \leq 0,35$	$V_{85} > 100 \text{ km/h}$
B	$0,35 \leq Q/C < 0,50$	$V_{85} > 80 \text{ km/h}$
C	$0,50 \leq Q/C < 0,70$	$V_{85} > 70 \text{ km/h}$
D	$0,70 \leq Q/C < 0,85$	$V_{85} > 60 \text{ km/h}$
E	$0,85 \leq Q/C < 1,0$	$V_{85} > 50 \text{ km/h}$
F	$Q/C \geq 1,0$	$V_{85} > 50 \text{ km/h}$

HCM 2000 ha definito in forma quantitativa i livelli di servizio attraverso diversi parametri, indicando coefficienti che mutano in relazione alla tipologia stradale:

- per le autostrade e superstrade ha adottato la densità (valori di soglia: 7, 11, 16, 22, 28 veic/km)
- per le strade ad unica carreggiata ha adottato la percentuale di tempo in coda (sorpasse impedito) e la velocità media di viaggio.

Per le autostrade la determinazione del livello di servizio deriva dal grafico riportato in calce, ove al variare della  $V_{FL}$  (assimilabile alla velocità di progetto) si modifica la  $Q_{max}$  riferibile ai livelli di servizio.



Ad esempio per restare in un livello di servizio A il traffico per singola corsia deve essere inferiore a 650 veic/h per  $V_{FL} = 120$  km/h. Analogamente per il livello di servizio D la portata Q non deve superare 1955 veic/h per  $V_{FL} = 90$  km/h e 2200 veic/h per  $V_{FL} = 120$  km/h.

Sempre in figura con  $Q^*$  si legge la portata al di sopra della quale il regime del traffico impedisce alla componente veicolare più veloce, questa volta corrispondente al 95° percentile ( $V_{95}$ ) di mantenere  $V_{FL}$ .

Nella tabella vengono riportati i valori numerici corrispondenti alla figura: si osservi che il rapporto Q/C è lievemente diverso dall'indicazione generale illustrata all'inizio, e soprattutto varia con  $V_{FL}$ .

Ciò conferma la regola generale che l'adozione di velocità di progetto elevate ( $> 100 - 110$  km/h) risulta essenziale anche in termini di capacità della strada.

La Tabella esprime una esemplificazione (da HCM2000) dei riferimenti numerici da adottare per superstrade e autostrade: lo schema è del tutto simile al precedente ma cambiano, di poco, i valori numerici di riferimento.

Le varie tabulazioni fornite da HCM 2000 consentono quindi, essendo note le caratteristiche geometriche, la densità, la portata e la velocità di flusso libero, di valutare il livello di servizio nel quale opera la strada in questione.

Ad esempio adottando per la capacità C un valore di riferimento di 2000 veic/h per corsia si mantiene un LOS B di esercizio fino ad un traffico orario di punta di

- $0,50 \cdot 2.000 = 1.000$  veic/h per  $V_{FL} = 100$  km/h
- $0,47 \cdot 2.000 = 940$  veic/h per  $V_{FL} = 90$  km/h
- $0,44 \cdot 2.000 = 880$  veic/h per  $V_{FL} = 80$  km/h
- $0,41 \cdot 2.000 = 820$  veic/h per  $V_{FL} = 70$  km/h

Si osservi inoltre che la velocità media del flusso è sempre inferiore, o al limite uguale per i LOS migliori, alla velocità di flusso libero  $V_{FL}$ .

Livelli di servizio in condizioni di base

$V_{FL}$ (km/h)		Livelli di servizio				
		A	B	C	D	E
100	Max densità media (vett./km/corsia)	7	11	16	22	25
	Velocità media V (km/h)	100,0	100,0	98,4	91,5	88,0
	Max rapporto Q/C	0,32	0,50	0,72	0,92	1,00
	Max portata di servizio (vett./h/corsia)	700	1100	2575	2015	2200
90	Max densità media (vett./km/corsia)	7	11	16	22	26
	Velocità media V (km/h)	90,0	90,0	89,8	84,7	80,8
	Max rapporto Q/C	0,30	0,47	0,68	0,89	1,00
	Max portata di servizio (vett./h/corsia)	630	990	1435	1860	2100
80	Max densità media (vett./km/corsia)	7	11	16	22	27
	Velocità media V (km/h)	80,0	80,0	80,0	77,6	74,1
	Max rapporto Q/C	0,28	0,44	0,64	0,85	1,00
	Max portata di servizio (vett./h/corsia)	560	880	1280	1705	2000
70	Max densità media (vett./km/corsia)	7	11	16	22	28
	Velocità media V (km/h)	70,0	70,0	70,0	69,6	67,9
	Max rapporto Q/C	0,26	0,41	0,59	0,81	1,00
	Max portata di servizio (vett./h/corsia)	490	770	1120	1530	1900

$f_b$  Coefficiente riduttivo della velocità per franchi laterali non adeguati

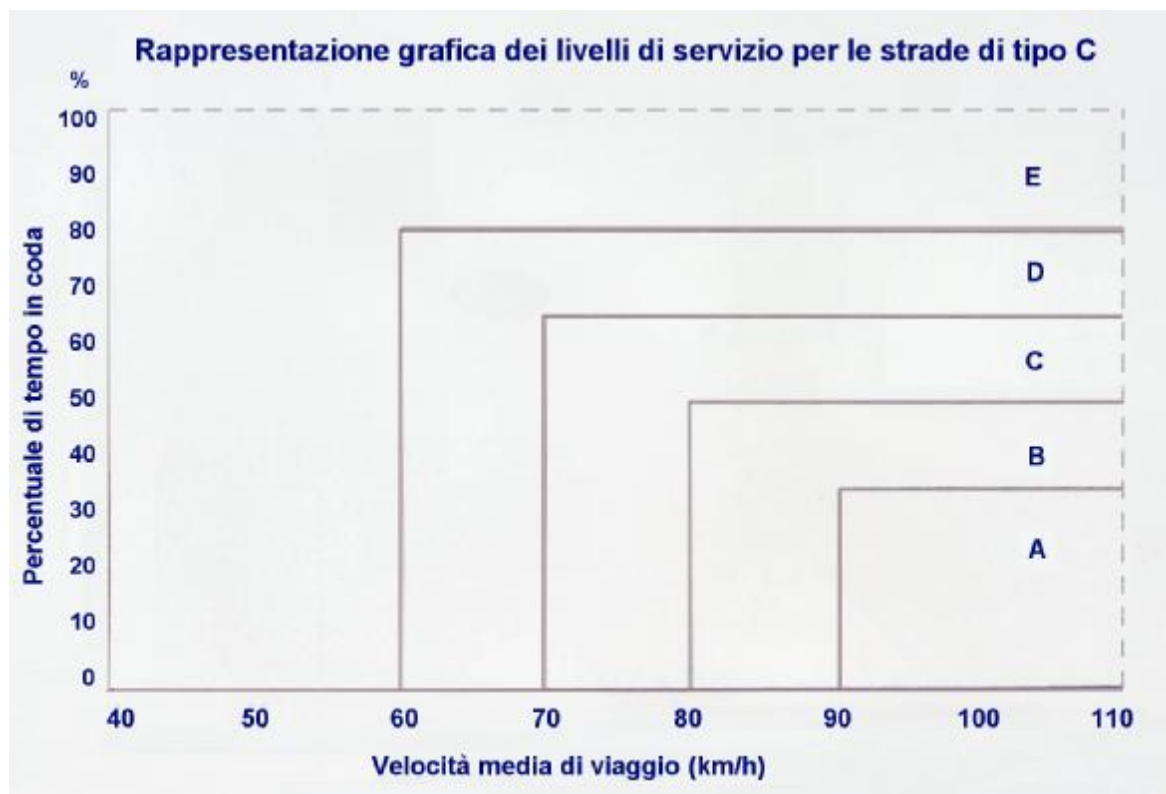
Due corsie per direzione	
Somma degli spazi laterali liberi per ogni direzione (m)	$f_b$ (km/h)
3,60	0,0
3,00	0,6
2,40	1,5
1,80	2,1
1,20	3,0
0,60	5,8
0,00	8,7

Tre corsie per direzione	
Somma degli spazi laterali liberi per ogni direzione (m)	$f_b$ (km/h)
3,60	0,0
3,00	0,6
2,40	1,5
1,80	2,1
1,20	2,7
0,60	4,5
0,00	6,3

Nota: qualunque sia lo spazio libero su ogni lato il valore massimo da considerare non si assume mai superiore a 1,80 m per cui il massimo di tabella è pari a 3,60 m.

Per le strade a unica carreggiata HCM 2000 fornisce i valori di riferimento dei due parametri adottati:

- per le strade migliori (tipo C secondo le Norme italiane) è significativa la velocità media di viaggio
- per le strade a bassa velocità di progetto (tipo F secondo le Norme italiane) è invece significativa per il livello di servizio la sola percentuale del tempo di coda.





Livello di Servizio	Strade C		Strade F
	Percentuale di tempo in coda	Velocità media di viaggio (km/h)	Percentuale di tempo in coda
A	$\leq 35$	$> 90$	$\leq 40$
B	$> 35 \leq 50$	$> 80 \leq 90$	$> 40 \leq 55$
C	$> 50 \leq 65$	$> 70 \leq 80$	$> 55 \leq 70$
D	$> 65 \leq 80$	$> 60 \leq 70$	$> 70 \leq 85$
E	$> 80$	$\leq 60$	$> 85$
F	Il tasso di flusso supera la capacità		

**Valori limite dei parametri che individuano i Livelli di Servizio per le strade C e F extraurbane**

In via preliminare, come previsto nelle precedenti edizioni HCM, il LOS di una strada ad unica carreggiata può comunque valutarsi con discreta approssimazione, ancora in base a Q/C e D

#### Applicazione pratica dei livelli di servizio

Progettare una strada secondo il Livello di Servizio significa superare la corrispondenza tra portata e capacità, definendo la geometria stradale per un traffico anche superiore a quello previsto, al fine di mantenere nell'ora di punta, buone condizioni cinematiche.

Le Norme italiane, per i vari tipi di strade, danno il LOS da adottare in sede di progetto, per il traffico dell'ora di punta. La scelta del livello di servizio dipende dalle funzioni assegnate alla strada nell'ambito della rete e dall'ambito territoriale in cui essa viene a trovarsi. Tanto più importante è la strada tanto migliore deve essere in ambito extraurbano, il LOS da adottare

Tipo di strada	Ambito territoriale	Livello di servizio minimo
Autostrade ( A )	Extraurbano	B
	Urbano	C
Extraurbana principale ( B )	Extraurbano	B
Extraurbana secondaria ( C )	Extraurbano	C
Urbana di scorrimento ( D )	Urbano	E
Urbana di quartiere ( E )	Urbano	E
Locale ( F )	Extraurbano	C
	Urbano	E

Ad esempio per una autostrada extraurbana si adotta il livello di servizio B: ciò significa che ammettere una portata per  $V_{FL} = 100$  km/h) pari a 1100 veic/h\*corsia, a fronte di una capacità teorica di 2400 veic/h\*corsia, cioè con rapporto Q/C pari a circa 0,5. Si progetta cioè la strada per un traffico doppio rispetto ai limiti di capacità: ciò per mantenere un buona velocità ( $V_{85}$ ) poiché in condizioni di livello di servizio pari a E ( $Q=C$ ) la velocità scenderebbe attorno ai 70 km/h (non accettabile per un'autostrada).

Le Norme italiane (D.M. 511/2001) recepiscono la teoria HCM 2000 sui livelli di servizio indicando, per le sei categorie di strade a base della classificazione, i seguenti dati:

- livello di servizio da adottare
- portata di servizio, cioè il massimo numero di veicoli/ora per corsia, compatibile con il livello di servizio prescelto.

Sul testo del Prof. Alessandro Ranzo (2<sup>a</sup> edizione) questo argomento è trattato alle pagine 227-229 cui si rimanda.

HCM è uno strumento in continua evoluzione: include molte tabelle e grafici per i vari casi stradali, urbani ed extraurbani.

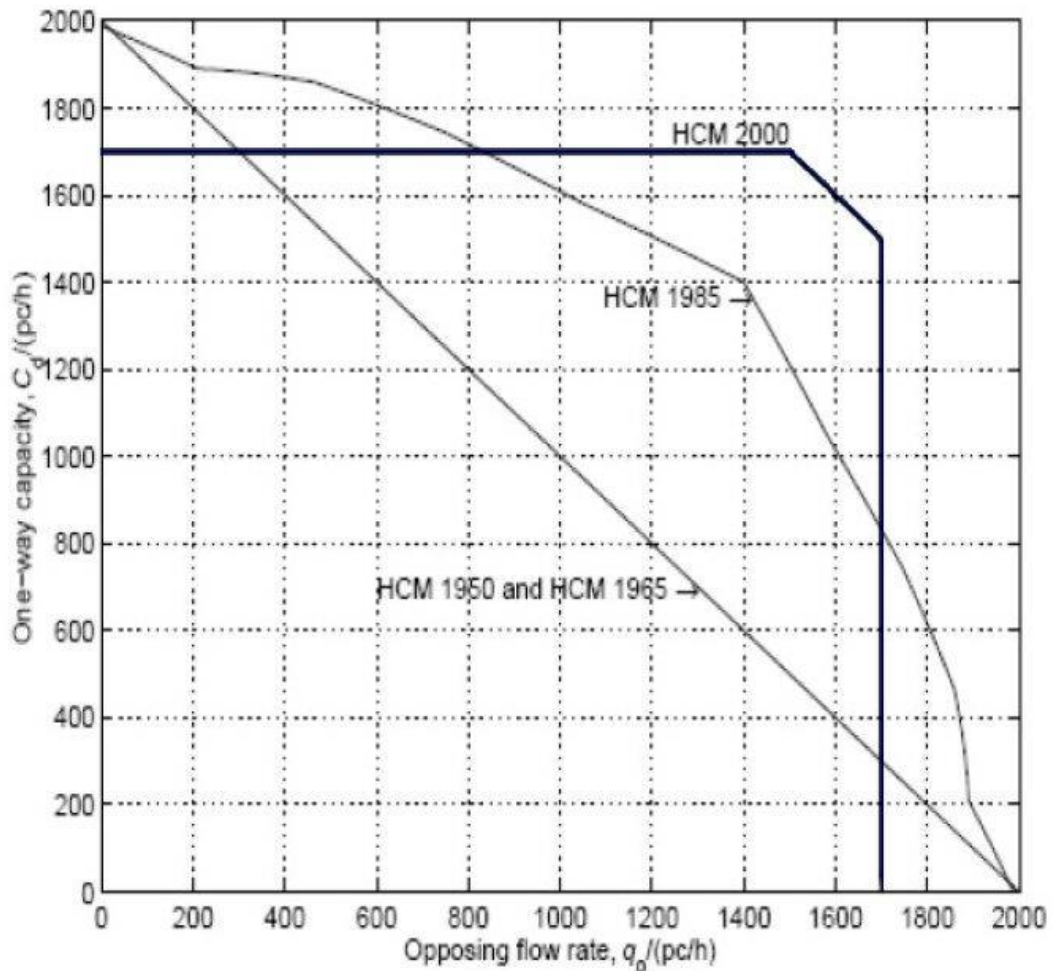
HCM è ricavato da rilievi relativi agli USA e pertanto, su alcuni aspetti numerici, va tarato alle situazioni specifiche presenti in Europa e ancor più in Italia.

Ad esempio la Regione Lombardia, pur rispettando il livello generale di inquadramento teorico, ha suggerito valori numerici di riferimento differenti da HCM2000 attribuendo in genere maggiori valori di capacità teorica ai vari tipi di strade.

Occorre precisare come molteplici considerazioni proposte dall'HCM, del tutto valide per il contesto statunitense, perdono significato qualora siano applicate pedissequamente al contesto europeo. Per l'HCM per le strade extraurbane di categoria D o F (una corsia per ogni senso di marcia) si calcola la capacità e la riduzione della velocità in relazione alla presenza di veicoli sulla corsia opposta, veicoli che determinano l'impossibilità di manovre di sorpasso ( si veda grafico in calce). Ma in Italia questa valutazione sulla capacità di un asse stradale non ha alcun senso poiché siamo sovente in presenza di un territorio con orografia complessa e quindi continuo divieto di sorpasso, oppure analogo divieto poiché le strade sono caratterizzate da molteplici intersezioni stradali.

Tipo di strada		Ambito territoriale		Livello di Servizio LOS		Portata di servizio per corsia (veic. equiv. / ora)	Valori orientativi Q/C
Autostrade	A	Extraurbano	Strada principale	B	due o più corsie	1.100	0,5
			<i>Eventuale strada di servizio</i>	C	<i>una corsia due o più corsie</i>	<i>650 1.350</i>	0,7
		Urbano	Strada principale	C	due o più corsie	1.550	0,7
			<i>Eventuale strada di servizio</i>	D	<i>una corsia due o più corsie</i>	<i>1.150 1.630</i>	0,85
Extraurbana principale	B	Extraurbano	Strada principale	B	due o più corsie	1.000	0,5
			<i>Eventuale strada di servizio</i>	C	<i>una corsia due o più corsie</i>	<i>650 1.200</i>	0,7
Extraurbana secondaria	C	Extraurbano	C1	C	una corsia	600	0,4
			C2	C	una corsia	600	1
Urbana di scorrimento	D	Urbano	Strada principale	E	capacità	950	1
			<i>Eventuale strada di servizio</i>	E	<i>Capacità</i>	<i>800</i>	1
Urbana di quartiere	E	Urbano		E	capacità	800	1
Locale	F	Extraurbano	F1	C	una corsia	450	0,7
			F2	C	una corsia	450	0,7
		Urbano		E	capacità	800	1

## HCM: effetti dei flussi veicolari sulla corsia opposta ai fini della determinazione della capacità di una corsia

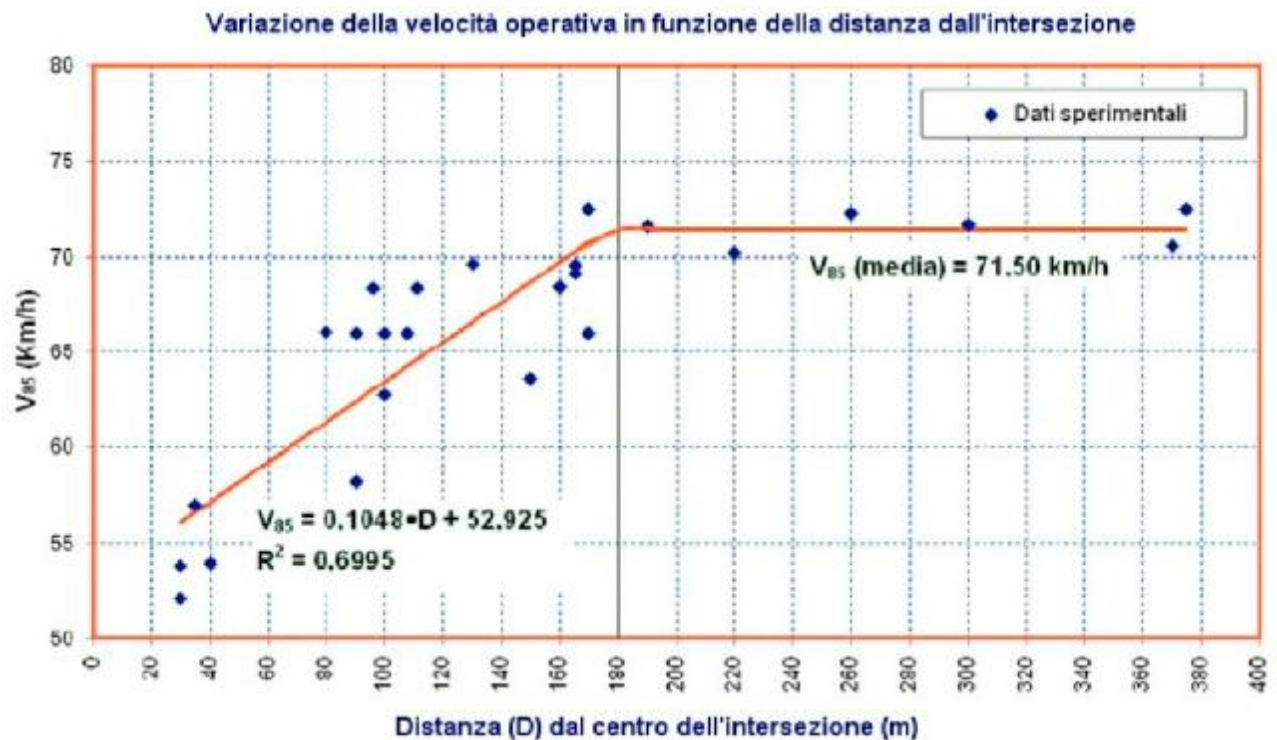


Va inoltre considerato come si riscontrino sempre diminuzioni delle velocità laddove vi siano innesti con altre strade, con decelerazioni sia dovute ai condizionamenti indotti dai veicoli in procinto di immettersi o di svoltare, decelerazioni dovute al principio di precauzione e prudenza, sovente rafforzato dalla segnaletica stradale.

Applicando in particolare la teoria al caso italiano, dove le rotatorie stanno monopolizzando ormai le opzioni progettuali degli incroci a raso, sarebbero da considerare con più attenzione gli effetti comportamentali dell'utente in avvicinamento alle intersezioni.

Nel grafico si osserva come la presenza di una intersezione, pur attrezzata, condizioni nell'esempio per 180 metri verso una riduzione di velocità, anche per i guidatori più veloci, individuati con V85.

In definitiva sembra opportuno valutare, al di fuori degli USA, i moltissimi dati dell'HCM come *work in progress*, calibrandone i contenuti numerici all'effettiva realtà (riscontrabile con rilievi mirati di traffico) relativamente ai comportamenti e al parco veicolare del territorio di studio.



## Le previsioni di traffico

Uno dei temi preliminari dell'ingegneria stradale è la determinazione del traffico da attribuire ad una strada in progetto o ad una rete in cui si prevedono interventi modificativi dell'assetto attuale.

Gli studi per il controllo e la gestione della domanda di trasporto hanno seguito due diverse tendenze:

- la prima che chiameremo di "previsione" fa uso di modelli matematici derivati dall'ingegneria del traffico e dalla ricerca operativa per analizzare le relazioni fra le infrastrutture fisiche e il flusso di utenti che le impegna. Questo tipo di applicazioni è mirato alla valutazione previsionale dei probabili assetti assunti dai sistemi di rete;
- la seconda che chiameremo di "gestione" si basa sul rilevamento in tempo reale dei dati di traffico attraverso serie di sensori (spire elettromagnetiche, fotocellule) ed è generalmente associata al controllo e alla formazione dei piani semaforici. In questo caso lo scopo primario è la gestione dei veicoli in tempo reale, che si ottiene trasformando il flusso di traffico in "pacchetti" attuati dai cicli semaforici.

Nel primo caso ci troviamo di fronte a un notevole sforzo di modellizzazione della realtà, ottenuta attraverso l'uso di strumenti matematici a volte di grande complessità, cui fa spesso riscontro l'inadeguatezza delle basi di dati e il loro rapido invecchiamento. Nel secondo caso abbiamo invece una



notevole ricchezza di informazioni sullo stato del sistema di trasporto (flusso, velocità, saturazione) che però viene scarsamente utilizzata per quegli scopi di simulazione e previsione necessari alle politiche di controllo.

L'impostazione dei modelli previsionali richiede la conoscenza di alcuni elementi di base sulla mobilità.

## Domanda di trasporto

La domanda di trasporto è rappresentata dal numero di persone o merci che devono utilizzare il sistema viario di rete per compiere uno spostamento tra la propria origine e la destinazione. La domanda di trasporto può essere fissa o elastica. Per domanda fissa si intende che gli spostamenti vengono generati da utenti che devono scegliere uno dei mezzi di trasporto possibili. Per domanda elastica si intende che gli spostamenti vengono generati da individui che possono scegliere tra le varie alternative di trasporto in base a considerazioni di carattere economico in senso lato.

## Matrice Origine - Destinazione ( matrice O/D )

La matrice O/D rappresenta la specificazione articolata della domanda di trasporto, cioè la quantità di persone o cose che devono spostarsi da un punto ad un altro della città o del territorio. Nel trattamento di problemi di traffico queste quantità vengono espresse come numero di veicoli equivalenti. Per determinare i veicoli equivalenti vengono utilizzati coefficienti di ingombro relativi al mezzo di trasporto e ai coefficienti di occupazione. Generalmente le matrici OD vengono costruite ricorrendo all'uso combinato dei modelli di generazione e delle stime dirette della domanda ottenute con indagini campionarie. La rappresentazione del dato in forma matriciale consente di determinare i flussi esistenti tra ogni origine e ogni destinazione.

## Il grafo di rete

Per consentire la trattazione matematica dei modelli di assegnazione è necessario rappresentare schematicamente la rete esistente mediante il ricorso alla teoria dei grafi. Ogni segmento del grafo, orientato per direzione di marcia, rappresenta un tratto stradale e viene definito arco del grafo. Per ogni arco avremo diverse caratteristiche associate e relative ai valori esistenti (o di progetto). Le caratteristiche sono di tipo geometrico o funzionale.

Ogni arco è caratterizzato da un nodo ai due estremi. I segmenti vettoriali denominati archi sono elementi fondamentali per la costruzione del grafo che approssima la rete esistente in forma matematicamente gestibile.

In relazione ad ogni problema viabilistico specifico il grafo di rete viene esteso a quella parte del sistema viario che si ritiene venga interessata dall'intervento. Per quanto riguarda i flussi aventi origine e destinazione nell'area più esterna rispetto a quella di studio si definiranno appositi nodi collegati da archi virtuali aventi capacità illimitata.

### Calibrazione del modello

Considerato come ogni grafo, per quanto schematico, rappresenti precisamente le caratteristiche geometriche e funzionali del sistema viario, ogni possibile calibrazione può essere effettuata solo per quanto riguarda i flussi assegnati, flussi riportati nella matrice origine – destinazione.

I flussi saranno noti soltanto per quei punti del grafo ove effettivamente siano stati condotti rilievi di traffico, denominati, se nell'area esterna, punti al *cordone*. Le indagini e i rilievi al cordone sono molto utili ma non sufficienti. Tutte le sezioni ove siano stati rilevati i flussi di traffico (per senso di marcia) saranno i punti ove si calibrerà il modello di assegnazione. Tante più sezioni di rilievo saranno disponibili, tanto migliore (e più agevole) sarà la calibrazione.

I problemi connessi alla calibrazione della matrice origine - destinazione, sono dovuti principalmente agli alti costi delle indagini e alle difficoltà di aggiornamento delle stesse in epoche successive.

Questi punti rappresentano alcuni importanti limiti nella corretta definizione della domanda di trasporto.

Prima di procedere alla fase di valutazione del traffico futuro è necessario testare il modello sul grafo della rete esistente. Infatti, se il modello è stato correntemente implementato, assegnando la matrice origine – destinazione si dovranno ritrovare i valori di flusso reali, flussi noti per tutte le sezioni di rilievo. Se tale corrispondenza non viene ottenuta bisogna calibrare i parametri del grafo e i meccanismi interni del modello affinché per la via teorica dell'algoritmo matematico ci si avvicini il più possibile alla realtà. Quando viene ultimata con successo la calibrazione si può passare al grafo che rappresenta la situazione futura, caratterizzata dalle modificazioni e/o integrazioni dell'intervento in progetto.

Il monitoraggio delle reti, ottenuto attraverso la stesura di sensori (spire elettromagnetiche a loop induttivo o risonanza, fotocellule, sensori a infrarossi e a ultrasuoni) senza rilevamento automatico della targa, ci informa sulle condizioni di carico del sistema ed è di fondamentale importanza per la calibrazione della matrice origine - destinazione.

Questo metodo però non fornisce informazioni circa le provenienze dei veicoli transitanti e per ovviare a questo limite si fa spesso ricorso all'analisi dei dati relativi ai movimenti pendolari e alla creazione quindi delle linee di desiderio, congiungenti cioè direttamente i punti origine e destinazione dello spostamento.

## La simulazione della domanda di traffico

I flussi veicolari che impegnano gli archi stradali di una rete di trasporto sono il risultato del modo in cui gli utenti del sistema scelgono uno fra i percorsi possibili che collegano la loro zona di origine a quella di destinazione. La possibilità di simulare il comportamento del sistema stradale per verificare l'efficacia delle ipotesi di intervento rappresenta un elemento molto importante.

Quanti veicoli utilizzeranno una nuova strada in progetto ? Quali percorsi scegliere per un uso più razionale delle risorse della rete stradale? Cosa accadrà al sistema se verranno introdotte modificazioni quali l'apertura di nuovi sensi unici o la creazione di isole pedonali? Cosa accadrà al sistema se verranno creati nuovi punti di attrazione ( centri commerciali, di ricerca, ospedalleri,...)? Sono queste le domande più rilevanti a cui le operazioni di previsione devono fornire risposta.

I modelli che vengono impiegati per descrivere il modo in cui la domanda di trasporto utilizzerà il sistema, impegnando gli archi della rete e generando dei costi (spesso coincidenti sostanzialmente con i tempi di spostamento) che rappresentano la "resistenza" dell'utente ad utilizzare quel sistema di trasporto, sono chiamati "modelli di assegnazione del traffico".

I modelli di assegnazione di equilibrio (deterministici e/o stocastici) assumono, per determinare l'assetto del grafo di rete, l'esistenza di una dipendenza circolare fra domanda, flussi e costi. Infatti la domanda di trasporto di un dato sistema è influenzata dai costi, i flussi dipendono dalla domanda e i costi dipendono dai flussi. Il problema di equilibrio affrontato dai modelli di assegnazione consiste nel determinare una configurazione del sistema congruente con i costi che da essa derivano.

I due principi fondamentali su cui si basano i modelli di assegnazione del traffico sono stati enunciati da Wardrop (1952). Il primo principio afferma che ogni utente si comporta in modo da minimizzare il proprio costo di viaggio. In questo modo il traffico si distribuisce sulla rete producendo uno stato di equilibrio in cui i costi percepiti dagli utenti lungo gli itinerari utilizzati **non sono superiori ai costi sui percorsi non utilizzati**. **L'assetto che ne risulta, in assenza di limitazioni, è del tipo "user optimized"**.

Il secondo principio, di carattere normativo, afferma che gli utenti si comportano in modo da ottimizzare una funzione obiettivo aggregata (ad esempio minimizzare il costo totale o medio di spostamento) in modo da determinare una distribuzione della domanda di traffico più efficiente dal punto di vista collettivo.

**L'assetto che ne risulta è del tipo "system optimized"**.

## L'algoritmo

Nel 1952, John Glen Wardrop ha affermato due principi tesi a formalizzare il problema dell'equilibrio nella scelta dei percorsi. Wardrop ha introdotto il concetto di comportamento ottimo per l'utente basato sulla minimizzazione dei costi di viaggio e i modelli di assegnazione si basano su questi principi: dati un

flusso tra un'origine e una destinazione, l'itinerario scelto è quello che minimizza i costi (costo solitamente riferito alla variabile temporale).

Dal punto di vista computazionale vari autori hanno proposto una formulazione del problema di Wardrop. Una generica formulazione del problema è questa: sia "d" il vettore della domanda di trasporto che deve distribuirsi sulla rete lungo una data sequenza e "p" il vettore dei flussi sugli itinerari da "d". Ogni utente che debba spostarsi, all'epoca "t\*", da una origine a una destinazione sceglierà uno qualsiasi tra tutti gli itinerari possibili che collegano la coppia della Matrice OD ma la scelta ricadrà con buona probabilità, per quegli itinerari che presentano un fattore di impedenza minore (minore tempo, minore costo tipico delle strade non a pedaggio, ecc.). Tutti gli utenti per compiere il tragitto sopportano un costo, dato dalla somma dei costi sui singoli archi, costo che, per quanto riguarda la variabile temporale, dipenderà strettamente dai flussi di traffico che impegnano la rete (l'utente quindi deve scegliere ma la scelta sarà condizionata dalla scelta effettuata dagli altri). Al termine del tragitto l'utente confronterà il costo di viaggio con quelli da lui stesso sostenuti precedentemente su altri itinerari che collegano la stessa coppia OD.

Un modello di assegnazione ripartisce quindi i flussi presenti nella matrice OD valutando come, qualora esista un itinerario meno costoso per l'utente, questi potrebbe utilizzarlo. Siamo sempre nel campo della probabilità: sovente gli utenti non mutano strada poiché preferiscono percorrere quelle che già conoscono anche se un qualsiasi utente potrebbe optare per un itinerario alternativo in quanto la differenza positiva di costo (minor tempo di percorrenza) lo dovrebbe spingere a cambiare.

Si ricordi che la voce principale dei costi di spostamento è proprio quella legata alla variabile temporale. Considerando l'insieme degli spostamenti effettuati da tutti gli utenti si potrà asserire che, a seguito delle decisioni prese all'epoca t\* si è prodotto un vettore p\* di flussi lungo gli itinerari OD cui corrisponde un vettore di costi C(p\*).

Tale per cui il costo totale del sistema sarà dato dalla :  $p^* C(p^*)$  (1)

Se i costi sopportati da alcuni utenti sono maggiori di quelli su possibili itinerari alternativi per la stessa origine destinazione, successivamente tali utenti saranno indotti a mutare percorso generando un vettore di flusso p\*\* lungo gli itinerari. Le componenti di costo contenute in C(p\*) relative ai nuovi itinerari saranno inferiori e quindi avremo che

$$p^{**} C(p^*) < p^{*o} C(p^*) \quad (2)$$

$$\text{e cioè } (p^{**} - p^*)^o C(p^*) < 0 \quad (3)$$

L'esistenza di p\*\* che verifichi la (3) è la condizione necessaria per l'esistenza di un vettore di flussi diverso da p\* nell'epoca successiva a t\* e provverebbe che non esiste un'altra distribuzione di flussi raggiungibile: questa rappresenta una distribuzione di equilibrio e indica la condizione per cui i costi degli itinerari sui quali esiste un flusso sono uguali o minori di quelli relativi agli itinerari scelti (primo principio di Wardrop).

## Analisi dei Costi

Agli elementi topologici della rete sono state associate specifiche funzioni di costo allo scopo di descrivere quantitativamente il sistema stradale. Una "funzione di costo di un arco stradale" permette di legare il costo medio di trasporto ai flussi che lo influenzano cioè alle caratteristiche fisiche e funzionali dell'arco stesso. Nei modelli per l'assegnazione dei flussi di traffico le funzioni di costo utilizzate hanno lo scopo di tradurre il numero di veicoli attribuito alle singole direzioni di marcia sulla base di due fattori: il tempo di percorrenza e la densità dei veicoli (rapporto tra numero di veicoli e capacità dell'arco stradale).

Trattandosi di reti stradali in aree urbane, dove l'effetto di congestione è più sensibile, sono solitamente utilizzate funzioni di costo del tipo "a flusso interrotto" che risultano essere notevolmente diverse da quelle che si hanno quando prevalgono condizioni "di flusso ininterrotto"

Il flusso ininterrotto è caratteristico delle reti extraurbane ove il tempo di percorrenza di un arco risulta prevalente rispetto ai probabili tempi di ritardo che si verificano in corrispondenza delle intersezioni. In questo tipo di funzioni il tempo di attesa non viene considerato.

Il flusso interrotto è quello utilizzato nelle aree urbane poiché ciò che effettivamente determina la curva di deflusso di un arco stradale è il tempo speso nell'attraversamento degli incroci. Questo perché la lunghezza degli archi è generalmente molto ridotta e la velocità di percorrenza è scarsamente influenzata dal flusso che impegna l'arco. Per questo in alcuni modelli di assegnazione sono state sviluppate alcune funzioni di ritardo che tengono conto del tempo di attraversamento dell'intersezione sia essa semaforizzata o no.

**Le fasi di un processo di assegnazione sono le seguenti:**

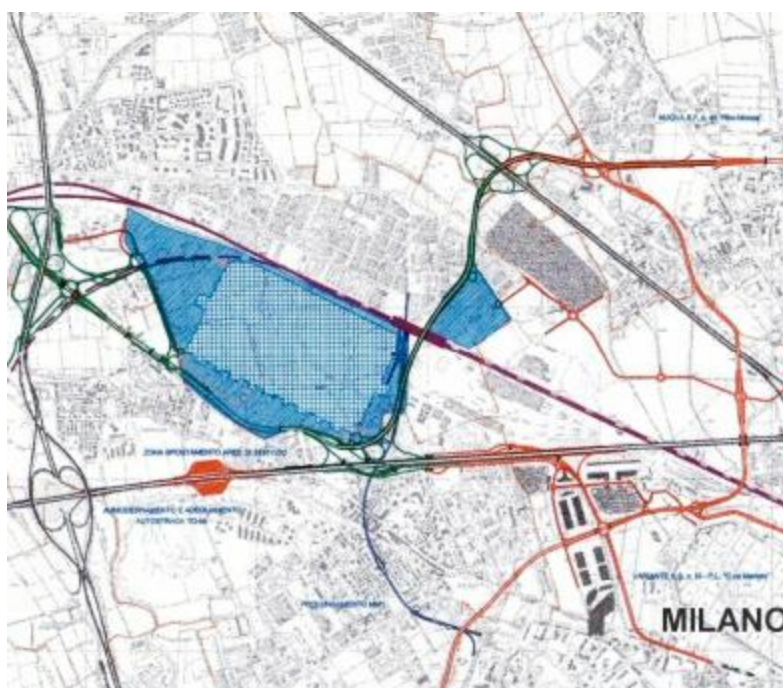
- 1) definizione del grafo della rete attuale
- 2) determinazione della matrice origine / destinazione
- 3) attribuzione dei flussi della matrice origine / destinazione al grafo attuale
- 4) calibrazione del modello di assegnazione (con uno scostamento massimo per ogni singolo punto di rilievo inferiore al 10% dei flussi espressi come veicoli equivalenti, in caso di scostamenti superiori occorre modificare la matrice).
- 5) modificazioni del grafo a seguito dell'intervento
- 6) attribuzione dei flussi di traffico alla rete così modificata.



Un esempio: la viabilità per l'accesso alla Fiera di Milano

Gli interventi viabilistici, , sono stati oggetto di simulazione modellistica e successivamente inclusi nel programma delle opere che vede ormai da due decenni coinvolti Enti Locali, Provincia di Milano, Regione Lombardia ed alcuni Ministeri. Le simulazioni di traffico sono state effettuate nel novembre 2002.

La realizzazione dell'intero tracciato della SP 46 "Rho - Monza", denominata autostrada A52 tra Paderno Dugnano e Monza, rappresenta il completamento dell'itinerario alternativo a nord dell'A4 per i traffici diretti dalla A4 Milano - Bergamo alle autostrade dei Laghi (A8 e A9) e viceversa, consentendo al contempo di raggiungere più celermente l'Aeroporto intercontinentale di Malpensa.

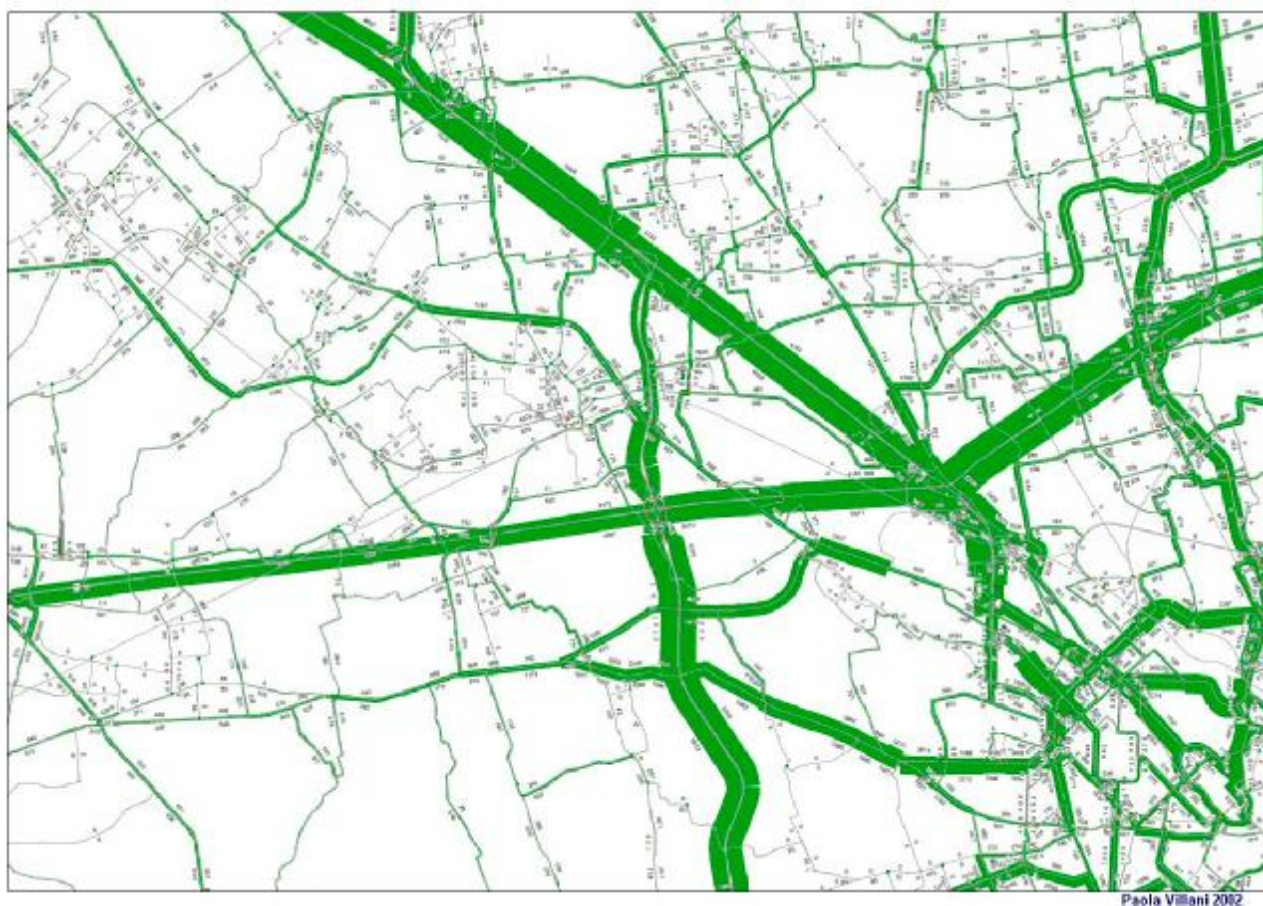


Nel 2002 la modellizzazione delle infrastrutture di collegamento a servizio dell'area del Nuovo Polo Fieristico di Milano fu condotta attraverso i seguenti passi:

- analisi e simulazione dei flussi veicolari che avrebbero interessato la rete viaria con "nuove infrastrutture a regime" (sia quelle relative ai trasporti su ferro, sia quelle viabilistiche) ed in funzione degli incrementi generati anche dall'attrattività della Fiera.
- analisi dei dati di traffico desunti dai monitoraggi effettuati dalle società autostradali (Autostrade per l'Italia, Autostrada TO-MI, Serravalle) e dalla Provincia di Milano e dal Comune di Pero;
- restituzione del grafo di rete relativo ad autostrade, tangenziali e superstrade, strade statali e provinciali ed alcuni archi della rete urbana primaria di Milano per un totale di 591 archi, 174 archi direzionali, 92 centroidi zonali (OD) e 517 nodi;
- laddove si disponeva dei rilievi relativi anche al traffico commerciale in transito, i dati furono trasformati direttamente in veicoli equivalenti; per tutti gli archi per i quali non si disponeva del

dato, la percentuale dei mezzi pesanti fu ricavata per analogia con archi contermini, verificando come i flussi di traffico merci fossero nel 2002, tra le 8.00 e le 9.00, pari al 10% dei flussi in transito;

- i flussi di traffico considerati per le simulazioni relativamente alla fase di progetto erano riferite all'Evento Critico Ordinario (maggior estensione temporale nell'anno), che determinava un apporto di 3.500 veicoli nell'ora di punta 8:00 - 9:00 del mattino, ritenendosi che in tale fascia oraria si determinasse la massima criticità per il sistema viario di afferenza della Nuova Fiera. L'assunzione di un valore "ordinario" rispetto alla gravitazione determinata dall'Evento Critico Straordinario, fu invece stimata in 6.400 veic/h, teoricamente accettabile in quanto si poneva nella logica del dimensionamento della capacità delle infrastrutture viarie sulla 30a OdP. Considerazioni relative ai particolari carichi registrabili sulla rete nelle fasce di maggior traffico operativo e – soprattutto – relative al fine settimana, furono ritenute estranee in quanto le "punte" non avrebbero coinciso con quelle da e per la Nuova Fiera e comunque la congestione della rete nel suo complesso non sarebbe stata risolvibile con i soli interventi connessi all'attrattività del nuovo Polo fieristico; ciò che invece avrebbe potuto determinare ulteriori carichi veicolari sul sistema sarebbe stata la realizzazione delle "strutture alberghiere, ricettive, commerciali e per il tempo libero" (oltre 60.000 mq di SLP) e considerando le potenzialità attrattive delle sole strutture commerciali (standard park: 1 mq/mq – 1 p.a/25 mq; attrattività di un C. Commerciale di 20.000 mq = 1700 veic. ora media; 2000 veic/OdP delle 17 – 18 del sabato) era presumibile ipotizzare una quota di ulteriore affluenza pari a 2.500 veic/h, riducibile a 1.750 veic. nella fascia 8,00 – 9,00: quota che comunque avrebbe costituito flussi aggiuntivi pari ad oltre il 50% rispetto all'usuale attrattività della Fiera;
- i flussi di ogni singola assegnazione furono comparati ai flussi rilevati sui 50 archi di controllo (sezioni di rilevamento) e, attraverso un processo iterativo fu calibrata la matrice OD, matrice che era costituita da 7.217 record per un totale di 236.081 veicoli equivalenti;
- il complesso problema dell'assegnazione dei flussi veicolari ai parcheggi della nuova Fiera, in assenza di una modalità di assegnazione dinamica degli stessi che potesse ripartire i flussi ottimizzando le destinazioni sulla base dei vincoli di capacità, è stato superato operando una semplificazione statistica e volta ad assegnare una percentuale congruente all'effettiva disponibilità di parcheggio delle sette aree considerate. Infatti i flussi afferenti ai parcheggi di corrispondenza della nuova Fiera sono stati ripartiti valutando la necessaria presenza di un sistema di indirizzamento ai parcheggi, sistema che avrebbe dovuto obbligatoriamente essere installato al fine di contrarre flussi parassitari.



Paola Villani 2002

## Glossario

C	capacità: massima portata veicolare possibile in un determinato tratto di strada.
D	Densità dei veicoli: rapporto tra numero di veicoli e capacità dell'arco stradale
GF	deflusso orario equivalente, o anche grado di flusso (GF) nel tempo <b>DT</b> definito dalla formula $GF \text{ (deflusso orario equivalente veic/h)} = F_{DT} [\text{veic}] * 60/DT [\text{minuti rilevati}]$
fb	Coefficiente riduttivo della velocità per franchi laterali non adeguati
O/D	matrice origine – destinazione
PHF	Peak-Hour-Factor rappresenta il numero di veicoli transitati durante un picco temporale della durata di 15 minuti
Q	portata veicolare in veicoli/ora (veic/h): entità del flusso veicolare nell'intervallo di tempo $\Delta T$
TGM	Traffico Giornaliero Medio risultante dal volume di traffico annuo diviso 365
T <sub>hpn</sub>	Traffico Ora di Punta Normale corrispondente alla situazione ricorrente di maggior circolazione
V <sub>FL</sub>	Velocità di flusso libero: velocità in condizioni di scarso traffico e guida non condizionata.